

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Numerická simulace svařování technologií GMAW

Numerical Simulation of the GMAW Process

Student: Bc. Radek Sztefek

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2010

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé diplomové práce může být naloženo dle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora a doporučení vedoucího katedry. V případě publikace výsledků nebo její významné části budu uvedený jako spoluautor.

V Ostravě 21.5. 2010

..... Radu G. H. Z.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon Č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB -TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona Č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2010

Radek Sztefek

podpis studenta

Radek Sztefek

Komorní Lhotka 91

739 53, okr. Frýdek- Místek

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SZTEFEK, R. Numerické simulace svařování technologií GMAW. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra mechanické technologie, 2010, 85 s. Diplomová práce, vedoucí Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá studiem numerické simulace svařování technologií GMAW a numerickou simulací procesu tepelného zpracování. V úvodu je popsána problematika svařování technologií GMAW a problematika numerické simulace svařování s využitím programu Sysweld. V experimentální části práce byly navrženy numerické modely jak pro proces svařování, tak i pro proces tepelného zpracování. Na těchto modelech byly numericky simulovány výše uvedené technologické procesy. Numerickou simulací byly zjištěny velikosti teplotních polí, zbytkových napětí, tvrdosti a stavy struktur po daném technologickém procesu. V poslední části práce je provedena diskuze k dosaženým výsledkům a rovněž byly provedeny návrhy úpravy technologických procesů, pro zajištění výhodnějších výsledků.

Klíčová slova: numerická simulace, svařování, tepelné zpracování, Sysweld

ANNOTATION OF GRADUATION THESIS

SZTEFEK, R. Numerical Simulation of the GMAW Process. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology – 345, 2010, 85 p. Graduation Theses, head Ochodek, V.

This graduation thesis investigates the numerical simulation of welding by GMAW technology and numerical simulation of heat treatment. The introduction describes the issue of GMAW welding technology and welding problems of numerical simulation using the Sysweld program. In the experimental part there were designed some numerical models for the welding process as well as for the heat treatment process. In these models have been numerically simulated the above mentioned technological processes. Through the numerical simulations have been found the sizes of temperature fields and residual stresses, hardness and states of the structures after the specific process. In the final part of this work is carried out a discussion about the obtained results. There were also made some suggestions for the adjustments of technological processes to ensure favorable results.

Key words: numerical simulation, welding, heat treatment, Sysweld

OBSAH

Seznam použitého značení.....	7
Úvod	8
1 Studium svařování technologií GMAW a problematiky numerické simulace	10
1.1 Studium svařování technologií GMAW- 131/135.....	10
1.1.1 Struktura elektrického oblouku	11
1.1.2 Tepelná energie elektrického oblouku	13
1.1.3 Tepelný výkon elektrického oblouku	14
1.1.4 Charakteristika svařování metodou MIG/MAG- 131/135	15
1.1.5 Proudová hustota a charakteristika zdroje	18
1.1.6 Přenos kovu v oblouku	19
1.1.7 Ochranné plyny pro svařování MIG/MAG- 131/135	22
1.2 Studium problematiky numerické simulace	26
1.2.1 Příklad tvorba modelu na jednoduchém příkladu v programu Visual-Mesh...	28
1.2.2 Příklad numerické simulace T- spoje v programu Sysweld	35
2 Návrh numerických modelů	44
2.1 Návrh numerického modelu pro tepelné zpracování a parametry tep. zprac.	44
2.2 Návrh numerického modelu pro svařování a parametry svařování	46
3 Výpočet teplotních polí a zbytkových napětí a porovnání s experimenty	52
3.1 Výstupy z numer. simulace tep. zprac. a jejich porovnání s experimenty	52
3.2 Výstupy z numerické simulace svařování a jejich porovnání s experimenty	63
4 Diskuze dosažených výsledků a návrhy úprav technolog. procesu svařování	75
3.1 Diskuze dosažených výsledků- tepelné zpracování	75
3.2 Diskuze dosažených výsledků- svařování, návrhy úprav technolog. procesu	77
5 Závěr	80
6 Seznam použité literatury	82
7 Seznam příloh.....	85

Seznam použitého značení

ZNAK	VELIČINA	JEDNOTKA
I	Svařovací proud	[A]
Q, Q _c , Q _n , Q _p , Q _r , Q _m	Teplo (Tepelný příkon)	[J]
Q _f	Skut. tep. příkon v přední části dvojitého elipsoidu	[kJ.mm ⁻¹ , J.cm ⁻¹]
Q _i	Měrný (Nominální) příkon svařování	[kJ.mm ⁻¹ , J.cm ⁻¹]
Q _r	Skut. tep. příkon v zadní části dvojitého elipsoidu	[kJ.mm ⁻¹ , J.cm ⁻¹]
Q _s	Skutečný příkon svařování	[kJ.mm ⁻¹ , J.cm ⁻¹]
T	Teplota	[°C]
U	Svařovací napětí	[V]
U _Z	Zápalné napětí	[V]
U _a	Úbytek napětí na anodové skvrně	[V]
U _k	Úbytek napětí na katodové skvrně	[V]
U _o	Úbytek napětí mezi elektrodami	[V]
U _c	Celkový úbytek napětí	[V]
a _f , a _r , b, c	rozměry elipsoidu	[mm]
t	čas svařování	[s]
v	Rychlost svařování	[mm.s ⁻¹ , cm.min ⁻¹]
x _o , y _o , z _o	Posunutí středu dvojitého elipsoidu	[mm]
y	natočení dvojitého elipsoidu v rovině x-z	[°]
η	Součinitel účinnosti svařovacího procesu	[-]
MAG (135)	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu	[-]
MIG (131)	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu	[-]
GMAW	Obloukové svařování v ochranných plynech	[-]

Úvod

V dnešní době, to je době, která je postižená ekonomickou recesí se přirozeně stále více uplatňuje funkčně nákladový princip, princip základající se na konkurenceschopnosti a úspěšné produkci výrobků, při dosažení optimální funkčnosti, za co nejmenší náklady, nemluvě o produkci neshodných výrobků, která je z ekonomického hlediska zcela nepřijatelná a výrobu značně prodražuje. Tento obecně známý princip platí a prolíná se rovněž do oblasti výroby ocelových konstrukcí, kde se k spojování konstrukčních dílů v jeden kompaktní nerozebíratelný celek využívá svařování. Rovněž zde se snažíme snížit výrobní náklady a předcházet výrobě neekonomických neshodných výrobků. Tohoto zde lze s úspěchem docílit numerickou simulací. V poslední době díky výpočetní technice dochází k razantnímu rozvoji simulačních programů, které vycházejí z metody konečných prvků. V současné době numerické simulace rovněž nacházejí uplatnění v celé řadě technologických procesů.

Podstatná část práce se zabývá numerickou simulací technologií svařování GMAW. Zde právě nabývá na významu výše zmíněný funkčně nákladový princip. Jelikož numerická simulace svařování ve vyšším slova smyslu představuje predikci (předpověď, předurčení) reálného procesu svařování. Tzn., že pomocí výpočetní techniky, za velmi krátkou dobu a s určitou mírou pravděpodobností, lze simulovat hned několik variant řešení výroby daného výrobku. Následným rozborem výstupních dat, lze vybrat takový návrh výroby, který se nám v konečném výsledku bude jevit jako nejvýhodnější pro výrobu dané svařované konstrukce. Takto numerickou simulací ověřené parametry výroby (svařovací parametry, přídavný materiál, postup svařování, technologie svařování,...) nám relativně věrně zajistí dosažení optimálních vlastností výrobku, přičemž výroba neshodných výrobků nám při dodržení těchto parametrů nehrozí, což představuje výše zmíněný funkčně nákladový princip. Rovněž při výrobě pomocí parametrů ověřených numerickou simulací dochází ke snížení nákladů a to především omezením počtu potřebných experimentů a tím i počet předvýrobních prototypů.

V experimentální části práce se zabývá problematikou numerických simulací procesů tepelného zpracování a svařování na konkrétních příkladech. Pro každou numerickou simulaci je nejdříve zapotřebí vytvořit vlastní numerický model, na který se bude aplikovat zadaný technologický proces. Každý navrhnutý numerický model musí mít určité náležitosti, které jsou nezbytné pro samostatnou numerickou simulaci daného procesu. Po úspěšném návrhu a vytvoření modelů se přistupuje k vlastní numerické simulaci, která se skládá z vlastního zadávání výrobních parametrů, samostatného výpočtu a následného zpracování a vizualizace výstupních výsledků z numerické simulace. Všechny tyto činnosti a problémy jsem se v rámci

v experimentální části práce snažil vyřešit a co nejpřesněji vykonat na zadaných konkrétních příkladech.

Nedílnou součástí této práce je verifikace, neboli ověření správnosti vypočtených hodnot s hodnotami, které poskytlo vlastní měření na reálných vzorcích. Náplní této práce je pouze poskytnout výstupní výsledky z numerických simulací a následně provést verifikaci těchto výsledků s experimentálními výsledky, které byly získány měřením na reálných vzorcích a poskytly je práce [17] a [18].

Nezbytnou součástí každé takto stavěné diplomové práce je diskuze dosažených výsledků, ve které bych rád uvedl možné příčiny neshod při srovnávání výše uvedených výsledků. Zároveň bych rád uvedl další možnosti, která nabízí řešení pomoci numerických simulací. Ty spatřuji především v realizaci nepřehledného množství kombinací vstupních údajů, kterými upravujeme daný technologický proces, se snahou zajistit výhodnější výstupní vlastnosti konečných součástí (vzorků).

1. Studium svařování technologií GMAW a problematiky numerické simulace

1.1 Studium svařování technologiemi 131 a 135

Svařováním rozumíme proces výroby nerozebíratelného spoje mezi dvěma svařovanými díly. Podle způsobu vytvoření svarového spoje v současné době rozeznáváme dvě velké skupiny metod svařování a to:

- metody tavného svařování,
- metody tlakové svařování.

U tavných metod svařování dochází k vytvoření svarového spoje pomocí tepelné energie, která je lokálně přiváděna do oblasti budoucího svarového spoje, tak že dochází k natavení základních materiálů a přídavného materiálu. Po oddálení zdroje tepla dochází k tuhnutí svarového kovu a následnému vzniku svarového spoje.

Zatímco u tlakových metod svařování dochází ke vzniku svarového spoje pomocí mechanické energie, která formou plastické deformace přiblíží svařované povrchy na vzdálenost, při které dojde k vytvoření vazby prostřednictvím meziatomových sil. Takto popsaným tlakovým způsobem svařování svařujeme díly z materiálů, které mají nízkou mez kluzu, jako je například hliník, měď, či nikl. Proto při svařování ocelí, která má mez kluzu podstatně vysokou pro čisté tlakové svařování, dochází k spolupůsobení mechanické a tepelné energie, kde tepelná energie sníží mez kluzu svařovaných materiálů.

Svařování metodami 131/135 právě patří do metod tavného svařování, kdy ke vzniku svarového spoje dochází vlivem tepla, které je dodáváno do místa budoucího svarového spoje z elektrického oblouku, který hoří mezi svařovaným materiálem a odtavující se elektrodou. Dodávaným teplem dochází k natavování základního materiálu a přiváděného přídavného materiálu, za vzniku svarové lázně. Oddálením tepelného zdroje dochází k ochlazování svarové lázně a k jejímu tuhnutí v kompaktní svarový spoj. Jako ochrana svarové lázně před škodlivými účinky okolní atmosféry, především jde o vytlačení škodlivých prvků jako je vodík a dusík se používá:

- inertní ochranný plyn,
- aktivní ochranný plyn.

Proto metodou svařování GMAW (Gas Metal Arc Welding) rozlišujeme následující svařovací technologie:

- Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu- MIG (Metal Inert Gas) (označení dle ČSN EN ISO 4063: metoda 131),

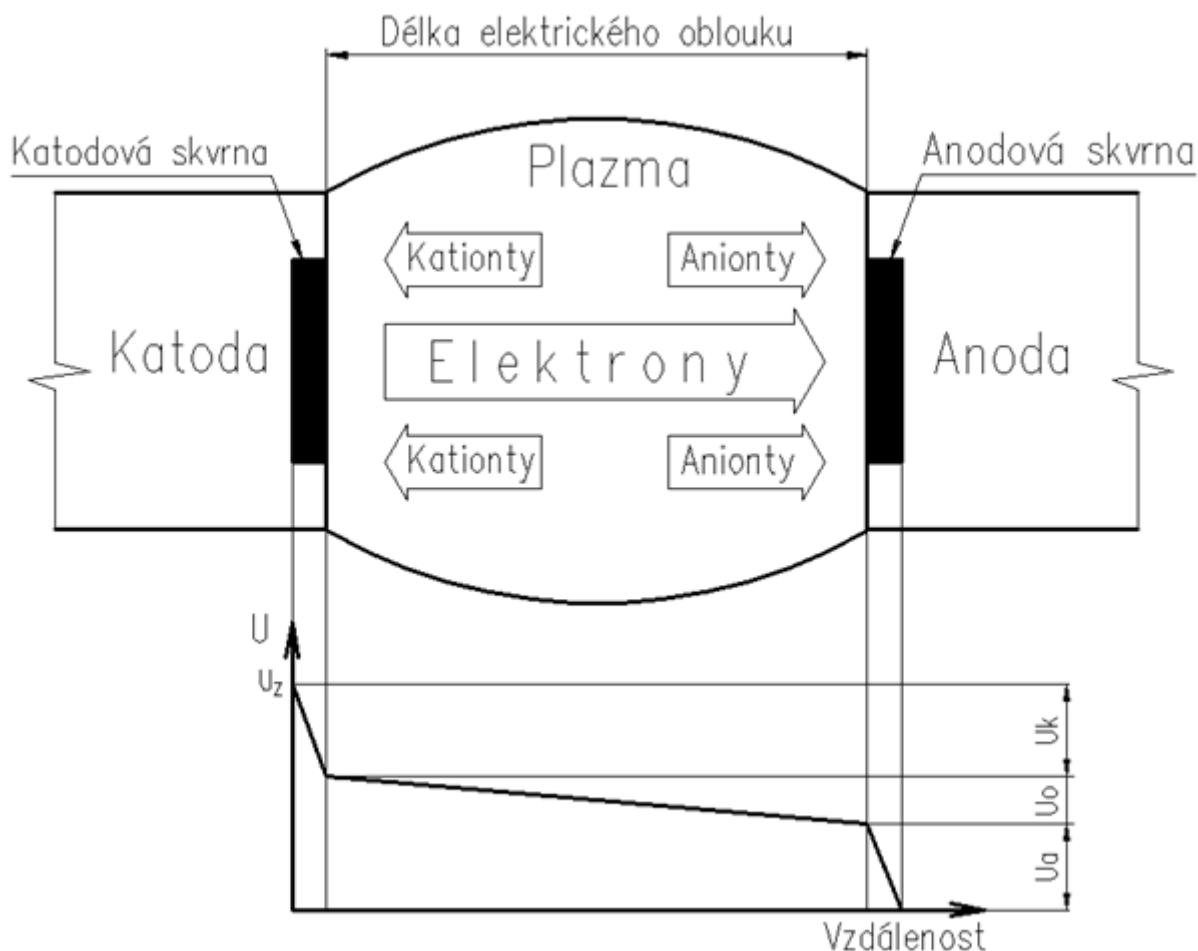
- Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu- MAG (Metal Activ Gas) (označení dle ČSN EN ISO 4063: metoda 135).

1.1.1 Struktura elektrického oblouku

Elektrický oblouk využívaný ve svařování je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj. Stabilita hoření je zajištěna za předpokladu dostatečného napětí pro ionizaci daného plynného prostředí a potřebného proudu pro udržení plazmy ve sloupci oblouku. Proto má každý elektrický oblouk svou voltampérovou charakteristiku.

K zapálení elektrického oblouku dochází při zápalném napětí U_Z , to je napětí na katodě, při které dochází vlivem vysoké teploty na katodě k termické emisi elektronů. Zápalné napětí závisí na materiálu elektrody a ionizační schopnosti daného prostředí. Plynné prostředí je za normálních podmínek elektricky nevodivé, proto k zapálení elektrického oblouku mezi elektrodami je zapotřebí vysoké napětí.

Struktura elektrického oblouku je znázorněna na obrázku č. 1. Silné elektrické pole způsobí termickou emisi primárních elektronů z katody (záporné elektrody) z katodové skvrny, při zápalném napětí U_Z . Pohyb primárních elektronů je ve směru od katody k anodě (kladné elektrodě). Primární elektrony při pohybu elektricky neutrálním plynným prostředím způsobují ionizaci plynu a to nárazy o atomy použitého plynného prostředí za vzniku kladného iontů (kationtů) a dalších sekundárních elektronů. Elektrony se při pohybu mohou slučovat s elektricky neutrální molekulou za vzniku záporných iontů (aniontů). Ionizací se z elektrického neutrálního plynu stává plyn elektricky vodivý. Přičemž na katodové skvrně dochází k neutralizaci kationtů a naopak na anodové skvrně dochází k neutralizaci aniontů. Tím na elektrodách vzniká teplo, vlivem přeměny kinetické energie částic. Vzniklým teplem na katodě se usnadní termická emise primárních elektronů, tudíž dochází k poklesu napětí v závislosti na hloubce katodové skvrny, jak je možno vidět z obrázku č. 1. Emitované elektrony musí mít dostatečnou kinetickou energii pro ionizaci plynu oblouku a dopadem na anodovou skvrnu dochází k přeměně kinetické energie pohybujících se elektronu na tepelnou. Pokles napětí na anodové skvrně je důsledkem neutralizace elektronů. Rozložení napětí v závislosti na délce oblouku není rovnoměrně. Největší pokles napětí je na anodové a katodové skvrně (U_a , U_k) a menší je mezi elektrodami (U_o), jak je tomu na obrázku č. 1.



Obrázek č. 1 Struktura elektrického oblouku

Části elektrického oblouku:

- Katodová skvrna- je ostře ohraničená oblast, která termickou emisi emituje prvotní elektrony důležité pro zapálení oblouku a pro ionizaci oblouku. Teplota katodové skvrny je cca 2600 °C.
- Anodová skvrna- na anodové skvrně jsou neutralizovány záporné částice a následně odváděny, přičemž kinetická energie částic se mění na tepelnou a z části na elektromagnetické záření. Teplota anodové skvrny je cca. 3000°C.
- Sloupec oblouku- je to oblast mezi anodovou a katodovou skvrnou a je to zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy. Ve sloupci oblouku se dosahuje vysokých teplot v rozmezí 4000 až 7000 °C.

Větší teplota anodové skvrny, oproti katodové skvrně je vysvětlována dopadem rychle pohybujících se elektronů na anodovou skvrnu, při které dochází k intenzivnějšímu vývinu tepla.

Napětí na oblouku v průběhu hoření závisí na materiálu elektrod, prostředí a délce oblouku. Se zvětšující vzdáleností elektrod se musí napětí na oblouku zvětšovat, aby oblouk neuhasl a naopak. Každé nastavené velikosti mezi elektrodami, přísluší kromě potřebného napětí také elektrický proud, který se určuje z voltampérové charakteristiky.

1.1.2 Tepelná energie elektrického oblouku

Pro dostatečné natavení základního a přídavného materiálů je rozhodující teplo dodávané elektrickým obloukem. Teplo musí být soustředěné a jeho velikost musí být dostatečná pro vytvoření svarové lázně potřebné velikosti. Při svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou, je celková tepelná energie přenášena do svařovaných materiálů dána součtem tepel

$$Q_c = Q_n + Q_p + Q_r + Q_m, \quad (1) [1]$$

kde:- Q_n ... energie získaná přenosem elektrických nábojů na elektricky aktivní skvrnu,

- Q_p ... energie získána tokem plazmy,
- Q_r ... energie záření, která se přenáší obloukem a elektrodovými skvrnami,
- Q_m ... energie získána přenosem kapek roztaveného kovu.

Největší část tepla přenášena do základního materiálů je nosičem elektrických nábojů a tokem plazmy, přičemž energie získána tokem elektricky usměrněných nábojů závisí na polaritě elektrického proudu.

Při přímé polaritě, kdy základní materiál je zapojen jako anoda a tavící se elektroda jako katoda, dochází k přenosu elektrické energie prostřednictvím elektronů, kdy elektrony získávají kinetickou energii termickou emisí v oblasti katodové skvrny a tu pak nárazem na anodovou skvrnu mění v tepelnou energii. Při obrácené polaritě, kdy zapojení je provedeno právě naopak, tudíž k ohřevu základního materiálu dochází pouze prostřednictvím kladných iontů. Při svařování metodami 131/135 a při přímé polaritě zapojení je hloubka natavené zóny velká, naopak při nepřímé polaritě je zóna tavení široká a plýtká.

Teplo přenášené tokem plazmy do základního materiálu je rozhodující pro tepelné a mechanické účinky elektrického oblouku na svařovaný materiál a to proto, že ve sloupci oblouku se dosahuje teplot 4000 až 7000 °C.

Při přímé polaritě zapojení a proudu 150 A se ve sloupci oblouku soustřeďuje 40 až 45 % celkové energie oblouku na odtavení přídavné elektrody a 30 až 37 % na odtavující se základní materiál. Při vyšších proudech nad 300 A dochází ke změně poměrů v rozdělení celkové energie oblouku a to přibližně 30 až 33 % na odtavující se přídavný materiál a 45 až 50 % na svařovaný základní materiál. [3] Tyto rozdíly způsobuje změna směru toku plazmy.

V prvním případě, při svařování při 150 A směřuje tok plazmy z anodové skvrny na základním materiálu do katodové skvrny, která je na odtavující se elektrodě, tzv. „Anodový oblouk“. V druhém případě, při svařování elektrickými proudy nad 300 A, má již plazmový tok opačný směr, čili od katodové skvrny nacházející se na odtavující se elektrodě, k anodové skvrně, která je na základním materiálu. Vzniká tzv. „katodový oblouk“. Se změnou toku plazmy dochází ke změně entalpie toku plazmy, u anodového oblouku je entalpie, čili tepelná energie uložená v jednotkovém množství toku plazmy $29 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, na rozdíl od katodového oblouku, kde je entalpie $25 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. [1]

Při obrácené polaritě, kdy se katodová skvrna na svařovaném základním materiálu plošně omezuje, má elektrický oblouk v širokém rozmezí proudu stabilní anodový charakter, tzn., že tok plazmy směřuje z anodové skvrny do katodové. Tudíž, je-li jako anoda odtavující se elektroda a katoda základní materiál, oblouk je anodový. V tomto případě je pak rozdělení celkové energie elektrického oblouku 20 až 30 % na odtavující se elektrodě a 55 až 60 % na základním svařovaném materiálu. [1]

Poměry přenosu tepelné energie ostatních složek do základního materiálu pro metody svařování 131/135 jsou následující: složka záření Q_r zaujímá z celkové energie oblouku přibližně 15% a složka Q_m , která se do základního materiálu přenáší kapkami roztaveného kovu přibližně 10 až 20 %. [1]

1.1.3 Tepelný výkon elektrického oblouku

Nominální tepelný příkon z elektrického oblouku Q je dán vztahem:

$$Q_1 = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2) [2]$$

$$Q_2 = \frac{60 \cdot U \cdot I}{v} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad (3) [2]$$

Vztahy (1) a (2) udávají měrný (nominální) příkon svařování a vyjadřují množství tepelné energie přivedené do svarového kovu, potřebné na vyrobení jednotkové délky jednoho spoje.

Tento nominální příkon kromě svařovacího proudu a napětí závisí na:

- prostředí, v kterém oblouk hoří,
- materiálu, tvaru a rozměrech elektrod,
- rychlosti svařování,
- ostatních technologických faktorech.

Při svařování se nevyužije všechno nominální teplo vnesené do svarového spoje, část vneseného tepla je v průběhu svařování nevyužita. Jsou to ztráty především kondukcí (vedením) a sáláním (zářením). Vztah pro výpočet skutečného příkonu je dán součinem nominálního příkonu a součinitele účinnosti svařovacího procesu η , který tyto ztráty zahrnuje.

$$Q_s = Q_{1,2} \cdot \eta \quad (4) [2]$$

Součinitel účinnosti svařovacího procesu závisí na rychlosti svařování, průměru elektrod, typu svarového spoje, fyzikálních vlastnostech svařovaného materiálu a délce oblouku. Účinnost se zvětší zkrácením délky elektrického oblouku. Pro metody obloukového svařování 131 a 135 nabývá tento součinitel hodnot viz tab. 1.

Tab. 1 Součinitel účinnosti svařovacího procesu. [5]

Součinitel účinnosti procesu svařování η [-]		
Technologie svařování	Rozsah	Střední hodnota
131 - GMAW (MIG) - (Ar-ocel)	0,66 - 0,70	0,70
135 - GMAW (MAG) - (CO ₂ -ocel)	0,75 - 0,95	0,85

1.1.4 Charakteristika svařování metodou MIG/MAG- 131/135

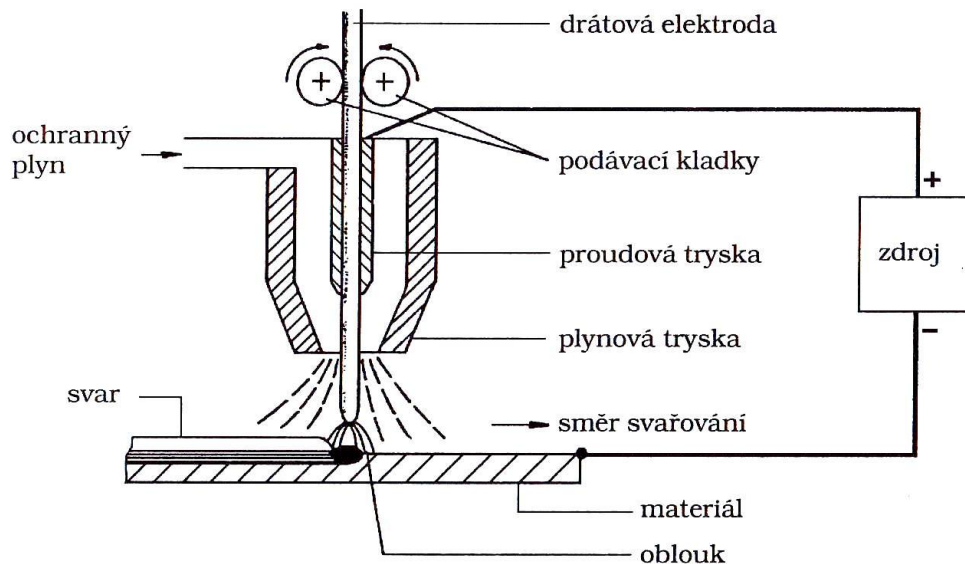
Svařování MAG- 135 v ochranné atmosféře aktivního plynu patří v celosvětovém měřítku vedle metody 111 (svařování obalenou elektrodou) k nejrozšířenějším metodám svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. MIG-131 svařování nabývá na důležitosti vlivem růstu konstrukcí vyráběných z hliníkových slitin. Hlavními důvody rozšíření metod svařování 131 a 135 jsou:

- rychlost svařování,
- velký výkon odtavení,
- široký výběr přídavných materiálů,
- široký výběr ochranných plynů,
- možnost mechanizace a automatizace,
- široký sortiment svařovacích zařízení.

Svařování technologií 131/135 je založeno na hoření elektrického oblouku mezi tavící se elektrodou, která je přiváděna ve formě drátu a základním materiálem. Přičemž hoření oblouku probíhá v atmosféře přiváděného plynu a to:

- aktivního (O_2 , CO_2 , ...)- MAG svařování (metoda 135),
- inertního plynu (argon, helium, ...)- MIG svařování (metoda 131).

Princip svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře MIG/MAG- 131/135 je znázorněn na obrázku č. 2.



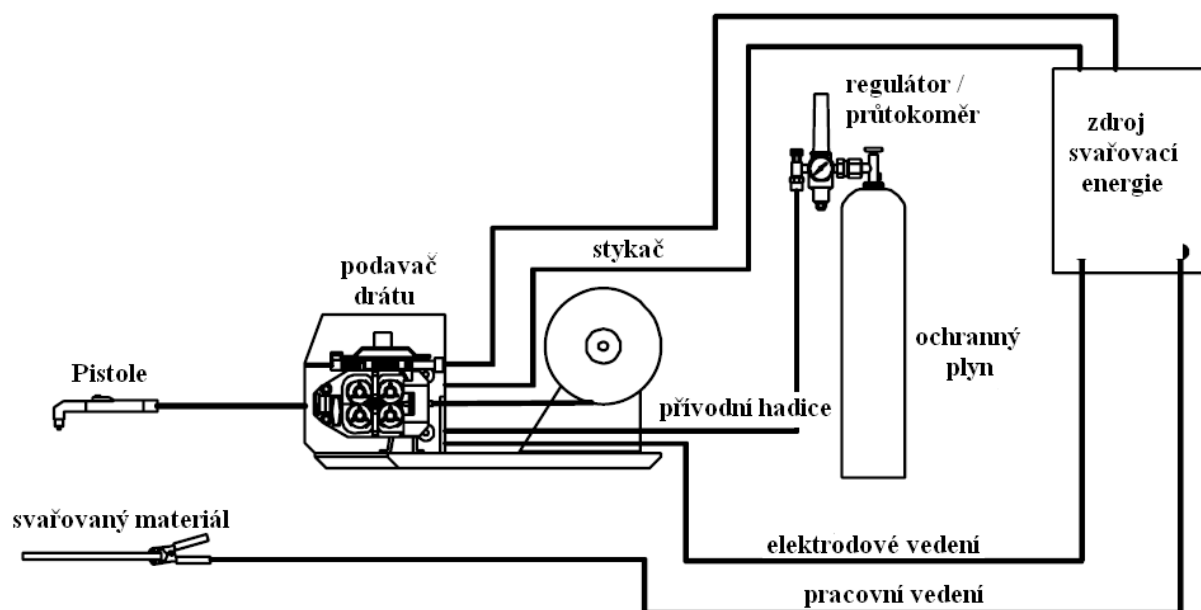
Obrázek č. 2 Princip MIG/MAG svařování [6]

Na obrázku č. 3 je zachyceno schéma svařovacího zařízení typické pro svařování technologiemi 131 a 135, které musí plnit následující funkce:

- podávání svařovacího drátu pomocí podávacích kladek ze zásobníku do svařovacího hořáku,
- přísun ochranného plynu do svařovacího hořáku z tlakové nádoby, přes elektrický ohřívač,
- dodávání elektrického proudu a napětí z elektrického zdroje.

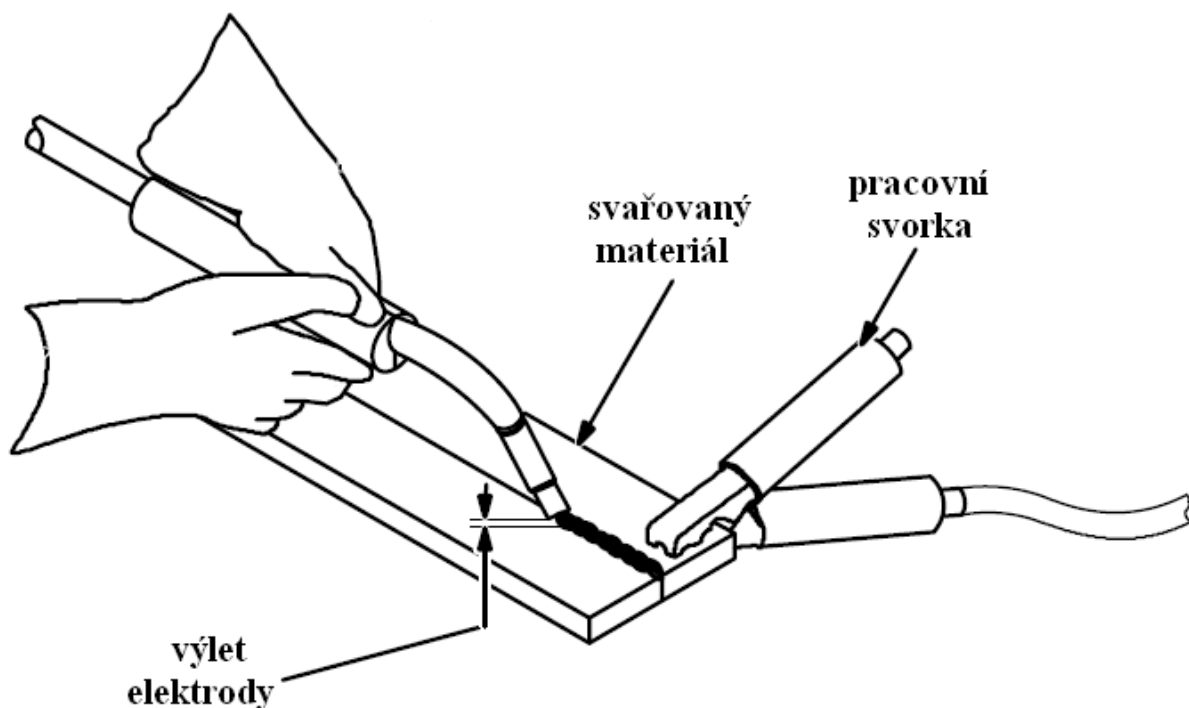
K zapálení elektrického oblouku nejčastěji dochází zkratem- kontaktním dotekem svařovací elektrody se základním materiálem. Podmínky zapálení elektrického oblouku především závisí na:

- ionizační schopnosti použitého plynu,
- druhu a průměru tavicí se elektrody,
- druhu a teplotě povrchu základního materiálu,
- na druhu a polaritě tavicí se elektrodě,
- na velikosti svařovacího proudu.



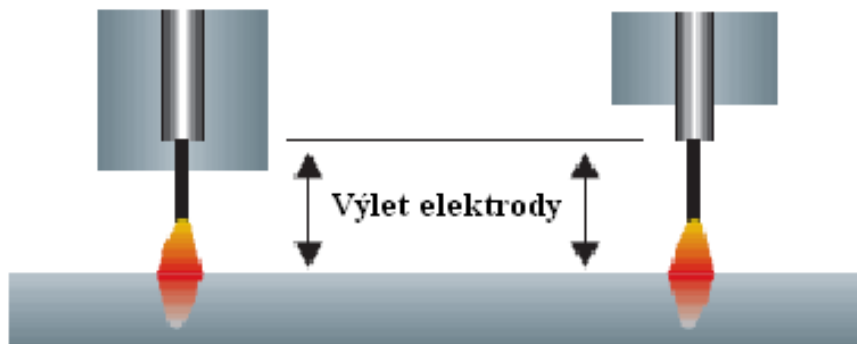
Obrázek č. 3 Svařovací zařízení GMAW procesu [24]

Na obrázku č. 4 je zachyceno ustanovení svařovacího hořáku vůči základnímu materiálu při svařování. Toto může být zabezpečeno manuálně pracovníkem, jak je tomu na obrázku č. 4. Nebo strojní mechanizací, kde k zabezpečení plynulosti rychlosti posuvu v závislosti na změně svařovacího napětí a proudu na oblouku se používají pohony s automatickou regulací rychlosti drátu.



Obrázek č. 4 Ustavení svařovacího hořáku vůči svařované součásti [24]

Důležitým parametrem, který je zachycen na výše uvedeném obrázku je výlet elektrody. Je vzdálenost měřená z kontaktní špičky hořáku k svařované součásti, viz obrázek č. 5. Tato vzdálenost je důležitá z důvodů tepelného zatížení konce drátu a přehřevu přídavného materiálu.



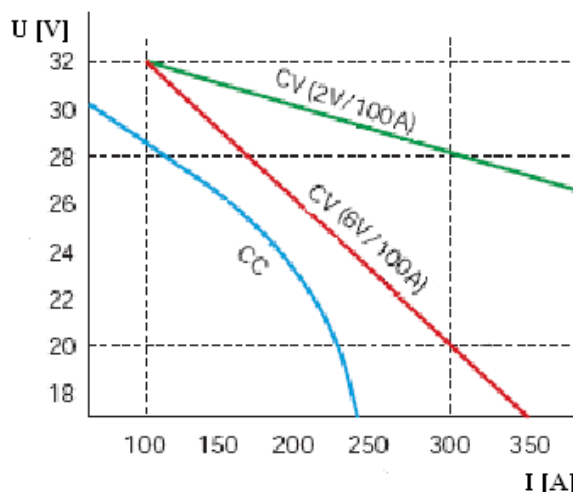
Obrázek č. 5 Vyložení konce drátu (výlet elektrody) [23]

1.1.5 Proudová hustota a charakteristika zdroje

Proudová hustota, čili poměr elektrického proudu k ploše, kterým proud protéká je při svařování metodami 131/135 nejvyšší ze všech obloukových metod. Při ručním svařování obalenou elektrodou se proudová hustota pohybuje v intervalu 20 až 30 A.m^{-2} , zatímco u metod 131/135 dosahujeme hodnot až 10x vyšších. Toto je způsobeno zatížením elektrod, při ručním svařování obalenou elektrodou na určitý průměr elektrody připadá omezený rozsah svařovacího proudu, zatímco při svařování metodami 131/135, při svařování elektrodou téhož průměru je proudový rozsah zatížení elektrody značně větší.

Při větších proudových zatíženích elektrod dochází k rychlejšímu odtavování svařovacího drátu, což je jednou z hlavních výhod těchto metod svařování. Přičemž odtavovací schopnost drátu je jeho charakteristická vlastnost, která závisí na jeho chemickém složení, průměru a použitém ochranném plynu.

Prvotním požadavkem při posouzení vhodnosti svařovacího zdroje je voltampérová charakteristika, která vyjadřuje závislost pracovního svařovacího napětí na svařovacím proudu za ustáleného času. Typické voltampérové charakteristiky jsou zachyceny na obrázku č. 6.



Obrázek č. 6 Křivky voltampérové charakteristiky [23]

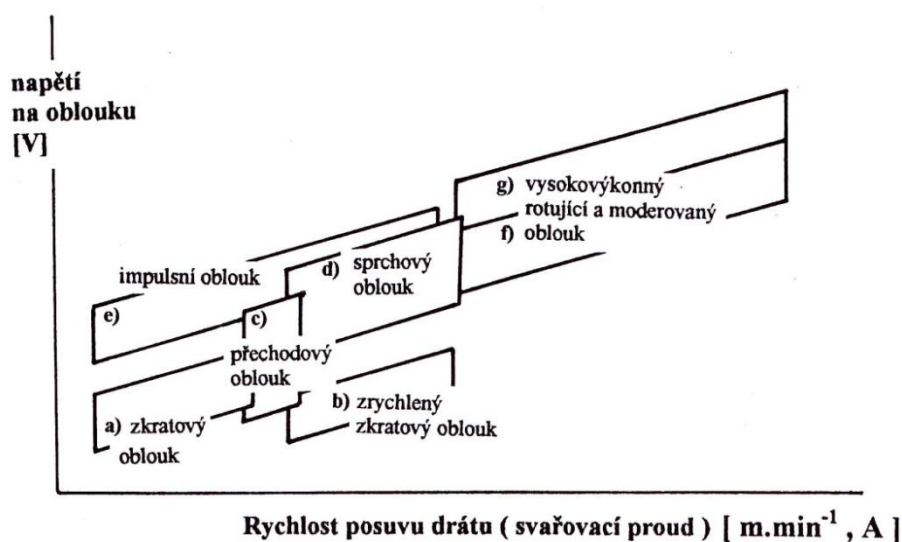
Kde charakteristika:

- CV(2V/100A)- je označována, jako plochá charakteristika s konstantním nastavením svařovacího napětí. Značí, že při každém zvýšení elektrického proudu o 100 ampér dojde k poklesu elektrického napětí o 2V.
- CV (6V/100A)- je označována, jako strmá voltampérová charakteristika a obdobně značí pokles napětí o 6 V při každé změně proudu o 100A, při konstantním nastavení svařovacího napětí.
- CC- značí voltampérovou charakteristiku s konstantním nastavením svařovacího proudu na zdroji.

1.1.6 Přenos kovu v oblouku

Přenos kovu v elektrickém oblouku patří mezi základní charakteristiky metody svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou. Přenos kovu závisí na více faktorech, nejvýznamnější roli hrají ovšem svařovací parametry, jako je svařovací proud a napětí. Na obrázku č. 7 jsou v grafické závislosti elektrického proudu a napětí zachyceny oblasti, kterým přísluší následující typy přenosu kovu:

- a) krátký oblouk se zkratovým přenosem
- b) krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem
- c) přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty (kapkový přenos)
- d) dlouhý oblouk se sprchovým přenosem
- e) impulzní oblouk
- f) moderovaný nezkratový přenos
- g) rotující oblouk



Obrázek č. 7 Oblasti přenosu kovu v oblouku [6]

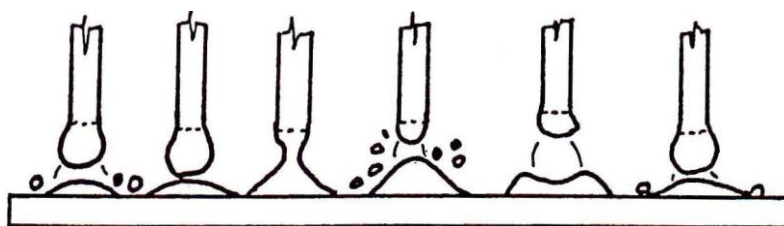
Způsob jakým se přepravuje kov z konce svařovací elektrody do svarové lázně, má výrazný vliv na proces svařování a působí na:

- proces stability hoření elektrického oblouku,
- rozstřík svarového kovu,
- kvalitu svaru a polozu při svařování.

Zkratový přenos kovu

Zkratový přenos kovu se nachází v rozsahu svařovacích proudů od 60 do 180 A, a při napětí 14 až 22 V. Těmto parametrům odpovídá výkon odtavení 1 až 3 kg.hod⁻¹. [6]

Při zkratovém přenosu dochází k přerušení existence elektrického oblouku, příčinou je zkrat, který je vyvolán přenosem kapky roztaveného kovu z elektrody do tavné lázně. Po přechodu kapky kovu do svarové lázně dojde opět k zapálení elektrického oblouku. Oddělení kapky a iniciace elektrického oblouku je doprovázeno rozstříkem svarového kovu, což je způsobeno oddělením kapky při vysoké intenzitě svařovacího proudu a následným dynamickým účinkem vznikajícího elektrického oblouku, při takto vysokých proudech. Celý proces je pak charakterizován údobím hoření elektrického oblouku a údobím zkratu, jak je tomu na obrázku č. 8. Proces probíhá při nižším napětí (krátkém oblouku) a podkritickém proudu.



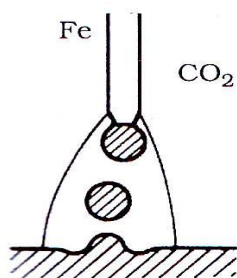
Obrázek č. 8 Průběh zkratového přenosu kovu v oblouku [6]

Kapkový přenos kovu

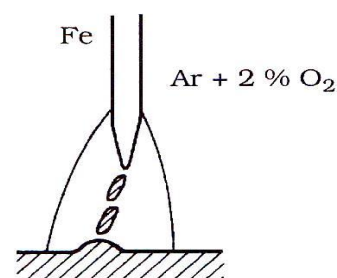
Tento typ přenosu kovu vzniká při napětích 22 až 28 V a proudech 190 až 300 A. [6] Při tomto přenosu se konec elektrody natahí do velké kapky, vlivem magnetických sil dojde k odtržení kapky a kapka je následně vržena do svarové lázně, viz obrázek č. 9. Odtrhová frekvence je 20 až 50 kapek za sekundu. Kapkový přenos je charakteristický pro obloukové svařování v ochranné atmosféře CO_2 .

Sprchový přenos

Sprchový přenos kovu v oblouku je typický pro hodnoty svařovacího proudu 200 až 500 A, a napětí 28 až 40 V. [6] Kapky tekutého kovu jsou jemně rozptýleny a tvoří jakoby „sprchu“, viz obrázek č. 10. Tento přenos lze realizovat ve směsích plynu Argonu s CO_2 , případně O_2 , nebo čistém argonu při svařování neželezných kovů. Při použití čistého CO_2 jako ochranného plynu, nelze sprchový přenos kovu realizovat díky vysokým hodnotám povrchového napětí v CO_2 , poněvadž nelze získat dostatečně drobné kapky kovu.



Obrázek č. 9 Kapkový přenos [4]

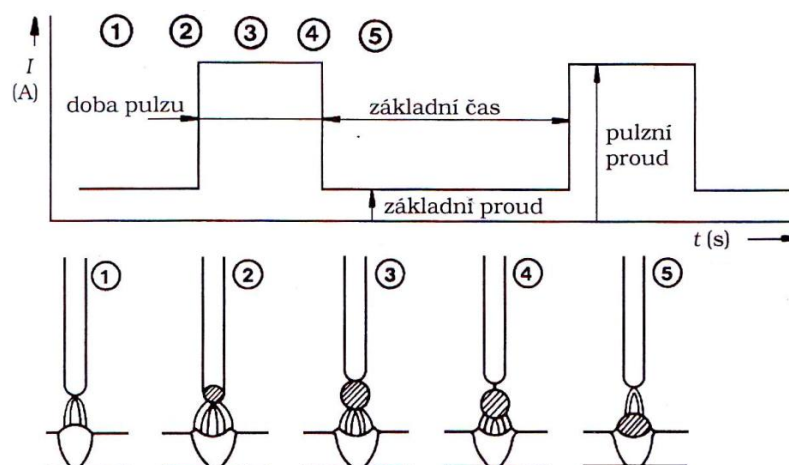


Obrázek č. 10 Sprchový přenos [4]

Impulsní přenos

Parametry impulsního svařování překrývají oblast zkratového i sprchového přenosu. Právě metody 131 a 135 s výhodou využívá svařování s pulzním obloukem (pulzním proudem), čímž dostáváme definovaný přenos kapek, při každém pulzu dojde k přechodu kapky roztaveného kovu z konce elektrody do svarové lázně. Průběh přechodu kapek je zachycen na obrázku č. 11 kde:

- 1- základní proud, který udržuje sloupec oblouku,
- 2- intenzivní puls začne rozžhavovat konec elektrody a dochází k tavení elektrody,
- 3- zaškrcení kapky na konci elektrody,
- 4- oddělení kapky,
- 5- dopad kapky do svarové lázně na začátku cyklu základního proudu bez rozstřiku.



Obrázek č. 11 Průběh proudu a přenos kovu impulsním svařováním [4]

Výhodou impulsního svařování je menší teplo vnesené do svarového spoje na jednotku jeho délky, tím docílíme menší hodnoty zbytkových termických napětí, rovněž dojde k rychlejšímu ochlazení svaru, což bude mít za důsledek zkrácení délky dendritické krystalizace, na úkor nárůstu objemu příznivé globulární krystalizace.

Rotující oblouk

Kombinací vhodné charakteristiky zdroje proudu (proud do 700 A, napětí 50 V) a přesného složení ochranného směsi plynu (65 % Ar + 26,5 % He + 8 % CO₂ + 0,5 % O₂) dosáhneme stabilního elektrického oblouku s rotací. [4] Vlivem silného magnetického pole je konec drátu ve vysoce plastickém stavu roztáčen a odtavené kapky kovu vytváří kuželovou plochou. Rotujícím obloukem vzniká závar do boku svarové plochy a vytváří hluboký a široký svar miskovitého profilu.

1.1.7 Ochranné plyny pro svařování MIG/MAG- 131/135

Ochranné plyny jsou nedílnou součástí procesu svařování technologiemi 131 a 135. Jejich základní úkol je ochrana svarové lázně, kapek kovu a konce tavících se elektrod a vysoce ohřátého základního materiálu před škodlivými vlivy okolní atmosféry. A to tak že jí vytlačí z místa svarového spoje, přívodem inertního nebo aktivního ochranného plynu. Přítomnost vzdušné atmosféry v místě nataveného materiálu způsobí oxidaci a nitridaci svarového kovu, rovněž způsobí zvýšení hladiny obsahu difuzního vodíku, což bude mít za důsledek snížení hodnot mechanických a plastických vlastností svarového spoje. Ochranné plyny rovněž svou ionizační schopností vytvářejí příznivé podmínky pro zapálení a stabilní hoření elektrického oblouku, rovněž svou tepelnou vodivostí přispívají k přenosu tepelné energie do svaru. Čím menší tepelnou vodivost má použitý ochranný plyn, tím lehčí je zabezpečení trvalého ionizačního procesu, pomocí kterého se posuzuje stabilita hoření

elektrického oblouku. Ochranné plyny svou povahou ovlivňují smáčivost a tekutost svarové lázně, což má v konečném důsledku vliv na tvar a rozměry svarové lázně a hladkost povrchu svaru. Tudíž je jasné, že ochranná atmosféra má výrazné postavení v procesu svařování a je nutností věnovat dostatečnou pozornost její správné volbě.

Pro MIG/MAG- 131/135 rovněž použitý ochranný plyn svým složením a množstvím ovlivňuje:

- metalurgické děje v době tvoření kapky, při přechodu kapky obloukem a ve svarové lázni,
- způsob přenosu kovu obloukem, tvar a rozměry kapek a jejich rychlost přenosu,
- hloubka a profil závaru,
- množství rozstříku,
- hladkost povrchu svaru a jeho přechod do základního materiálu,
- a rychlost svařování.

Jako ochranné plyny pro MIG-131 svařování se používají:

- argon- je základním plynem všech ochranných atmosfér, pro svou netečnost k chemicko-metalurgickým procesům během svařovacího procesu. Argon ve směsi ovlivňuje působení Lorenzovy síly na oddělení kapky od odtavované elektrody a to tak, že umožní dřívější přechod na sprchový přenos kovu. Argon vytváří široký svar s primárním hlubokým průvarem a sekundárním širokým závarem. Pro svařování ocelí se čistý argon zpravidla nepoužívá, pro neuspokojivé rozměry svaru, přechod svarové housenky do základního materiálu je s vysokým vrubovým účinkem. Argon je těžší než vzduch, proto lépe chrání svarovou lázeň, má menší ionizační potenciál než helium a tudíž se elektrický oblouk zapaluje snáz.
- Hélium- je lehčí než vzduch, tudíž se musí dbát na správné působení, proto je spotřeba hélia 3x větší. Ionizační potenciál je velký, oblouk se zapaluje hůř oproti argonu. Obloukem se přenáší větší množství tepla do svarové lázně, což způsobuje široký svar. Jelikož cena hélia je značně vysoká, používá se jen ve výjimečných případech.
- Směs argonu a helia- se používá při svařování hliníku a mědi.

Jako ochranné plyny pro MAG-135 svařování se používají:

- oxid uhličitý CO_2 a kyslík O_2 - Jsou aktivní komponenty, které vytvářejí oxidační účinek vůči základnímu materiálu. Jelikož tyto plyny jsou molekulární, dochází u nich při svařování k disociačnímu rozpadu. Následnou zpětnou rekombinací dopadem iontu na chladnější základní materiál dochází k velkému vývinu tepla z důsledku, že tato

zpětná rekombinace má charakter exotermický. Tato exotermická reakce výrazně ovlivňuje tepelnou bilanci svarové lázně, což se projeví v hloubce průvaru. Atmosféra CO_2 působí proti Lorenzově síle uvolnění kapky, proto rozměr takto uvolněné kapky je velký a při dopadu do svarové lázně dochází k značnému rozstříku svarového kovu. Pro svařování se používá oxid uhličitý s čistotou 99,5 %, který dává pravidelný hluboký závar s větším převýšením, používá se pro nelegované a omezeně pro nízkolegované oceli. Molekulární kyslík je přibližně dvakrát aktivnější než oxid uhličitý, proto pro směs se stejným oxidačním potenciálem stačí poloviční množství než CO_2 .

- Směsný plyn $\text{Ar} + \text{O}_2$ - obsahem kyslíku do 5% vede k široké, pouze mírně převýšené svarové housence. Přenos kovu je převážně sprchový, což způsobuje malý rozstřík.
- $\text{Ar} + \text{CO}_2$ - obsah oxidu uhličitého bývá do 8 %. Směsný plyn je optimální pro impulsní a sprchový přenos kovu obloukem s nízkým rozstříkem.
- Další směsi plynů ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$).

Výše uvedenými tří složkovými plyny v zastoupení kyslík, oxid uhličitý a argon, dosahujeme značných kvalitativních výhod (snížení míry rozstříku, zvýšení rychlostí svařování, tím rukou v ruce dosáhneme zvýšení výkonnosti svařování, dále pak optimálnějšího profilu svarové housenky a lepší vzhled svaru). Přestože kyslík je zastoupen pouze 2,5 %, má vcelku významný podíl na výsledných vlastnostech svarové lázně. Kyslík svým ionizačním potenciálem přispívá k zvýšení stability oblouku. Svou exotermickou rekombinací na základním materiálu ovlivňuje tepelnou bilanci na oblouku, což má za důsledek docílení mohutnějšího průvaru a zvýšení posuvové rychlosti. Dále pak kyslík umožňuje lepší smáčivost základního materiálu svarovým kovem, což způsobí menší vrubový efekt v přechodu svarové housenky do základního materiálu. Označování ochranných plynů se provádí dle chemického charakteru, požadavky na označení ochranného plynu dle chemického složení stanovuje norma ČSN EN ISO 14 175 je provedeno v tabulce č. 2, kde PAW značí svařování plazmou a PAC značí řezání plazmou.

Tabulka č. 2 Označování ochranných plynů [16]

Označení		Prvky v procentuálním objemu						Použití	Pozn.	
Skup.	Ident. číslo	Oxidační		inertní		Reduk.	Malá reak.			
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂			
R	1			zbytek ^b		0 ^a ÷15		WIG	Redukční	
	2			zbytek ^b		15÷50		PAW		
I	1			100				MIG	Inertní	
	2				100			WIG		
	3			zbytek	0 ^a ÷95			PAW		
M 1	1	0 ^a ÷5		zbytek ^b		0 ^a ÷5		MAG	Mírně oxidační	
	2	0 ^a ÷5		zbytek ^b						
	3		0 ^a ÷3	zbytek ^b						
	4	0 ^a ÷5	0 ^a ÷3	zbytek ^b						
M 2	0	0 ^a ÷15		zbytek ^b						
	1	15÷25		zbytek ^b						
	2		3÷10	zbytek ^b						
	3	0 ^a ÷5	3÷10	zbytek ^b						
	4	5÷15	0 ^a ÷3	zbytek ^b						
	5	5÷15	3÷10	zbytek ^b						
	6	15÷25	0 ^a ÷3	zbytek ^b						
7	15÷25	3÷10	zbytek ^b							
M 3	1	25÷50		zbytek ^b					Silně oxidační	
	2		10÷15	zbytek ^b						
	3	25÷50	2÷10	zbytek ^b						
	4	5÷25	10÷15	zbytek ^b						
	5	25÷50	10÷15	zbytek ^b						
O	1		100							
N	1						100	PAC	Nereag.	
	2			zbytek ^b			0 ^a ÷5		Inertní	
	3			zbytek ^b			5÷50			
	4			zbytek ^b		0 ^a ÷10	0 ^a ÷5			
	5					0 ^a ÷50	zbytek			Redukční
Z	Směsi plynů obsahující neuvedené složky, nebo směsi se složením mimo uvedený rozsah.									

^a Přesná hodnota procentuálního objemu prvku je 0,5 %.

^b Pro účely této klasifikace může být argon nahrazen částečně nebo úplně heliem.

1.2 Studium problematiky numerické simulace

V současné době dochází k razantnímu rozvoji simulačních prostředků na bázi metody konečných prvků. Numerické simulace zasahují do celé škály technologických procesů od tváření, přes slévání, tepelné zpracování až k svařování a do mnoho dalších odvětví. Kde lze predikci pomoci výpočetní technologií a za velmi krátkých časů věrně numericky simulovat mnoho variant řešení výroby dané součásti. A následně vybrat tu variantu výroby součástí, která nejlépe vyhovuje potřebám. Numerická simulace umožňuje virtuálně prověřit vlastnosti výrobků po aplikované technologii již v průběhu konstrukčního návrhu. Numerická simulace je ve většině případů výrazně levnější, nežli reálné zkoušky a experimenty prováděné na daném výrobním prototypu. Cílem numerické simulace je omezit počet skutečných prototypů, které slouží k vlastnímu experimentálnímu zkoušení, dále pak snížit počet neshod ve výrobě, tím rovněž dojde ke snížení nákladů na opravu zmetků. Tímto přístupem pak zákonitě dojde ke zkrácení doby vývoje, ke zkvalitnění a hlavně v dnešní době ke snížení nákladů v oblasti vývoje a výroby dané součásti. Predikci deformací nosníku po svařování se zabýval článek [22]. Demonstrace numerické simulace svařování ukázána na jednoduchém svařování T spoje, včetně ukázky výstupních výsledků po svaření se zabýval článek [9].

Numerické simulace pomáhají při:

- posuzování stability výrobního procesu a k řešení technologických problémů při výrobě svařovaných konstrukcí;
- identifikaci a poznávání výrobního procesu, či výrobních materiálů;
- volbě svařovacích parametrů;
- optimalizaci svařovacích procesů;
- implementaci nových výrobků do výrobního programu;
- splnění požadavků na jakost svarových spojů.

Numerické simulace zahrnuje vlivy následujících parametrů na svařovací proces:

- svařovací parametry, teplota přehřevu,
- pořadí, sekvence, počet a délka svarů,
- pozice a kumulace svarů,
- upínání svařovaných desek,
- materiálové vlastnosti,
- kombinace jednotlivých materiálů,
- strukturní transformace během svařovacího procesu, ...

Na základě výstupních výsledků obdržených numerickou simulací, které jsou:

- teplotní pole (teplotní cyklus),
- velikosti teplotně ovlivněných polí,
- struktura materiálu, tvrdost,
- plastická deformace konstrukce a zbytková napětí, ...

můžeme v průběhu přípravy výroby proces svařování upravovat a následně tento proces efektivně optimalizovat tak, abychom obdrželi požadované parametry vyrobené svařované konstrukce bez potřeby provedení experimentálních zkoušek. Tím rozhodneme o správné volbě svařovacího materiálu, svařovacích parametrů, postupu svařování, použité technologii svařování, atd. Predikcí deformací během svařování nízkotlakého tělesa parní turbíny se zabýval článek [25].

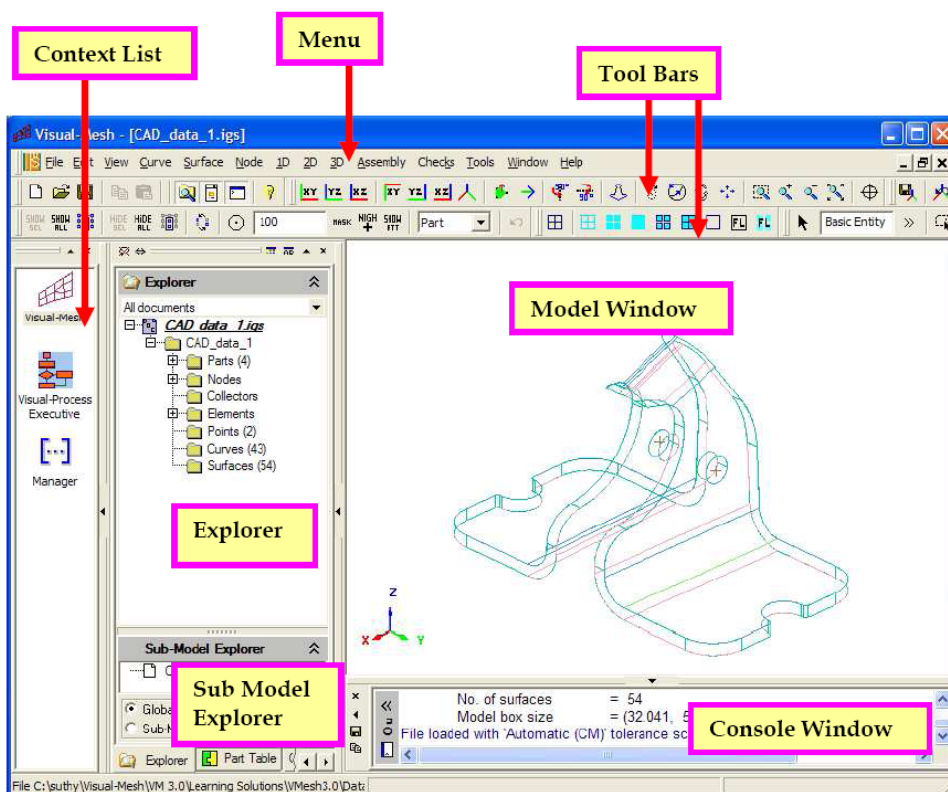
Nezbytným předpokladem v oblasti numerických simulací procesu svařování je návrh numerického modelu, na kterém se bude numericky pomocí výpočetní techniky aplikovat svařovací proces. V oblasti programové podpory pro numerickou simulaci procesu svařování se v současné době používají programy: Abacus, Fluent, QuickField aj. Díky rozsáhlé škále výstupních výsledků podávaných numerickým výpočtem se do popředí dostává program Sysweld. Experimentální část této práce bude právě založena na aplikaci tohoto výpočetního programu. Program Sysweld k tvorbě numerických modelů využívá kompatibilní program Visual-Mesh. Oba tyto programy nezbytné pro numerickou simulaci svařovacího procesu zprostředkovává firma Esi Group.

1.2.1 Příklad tvorba modelu na jednoduchém příkladu v programu Visual-Mesh

Uživatelské rozhraní Visual-Mesh

Jak již bylo výše řečeno, pro tvorbu numerických modelu, na kterých se bude aplikovat svařovací proces, použijeme program Visual-Mesh. Tento program není primárně používán pro tvorbu a kreslení složitých modelů, nýbrž lze do něj z jiného modelovacího programu importovat 3D model, ten dále diskretizovat a použít jako podklad pro numerickou simulaci. Další možnosti využití programu je pro vlastní modelování, pomocí základních kreslicích a modelovacích příkazů v uživatelském rozhraní. Uživatelské rozhraní včetně popisu je zachyceno na obrázku č. 12, na snímku uživatelského rozhraní je zobrazeno:

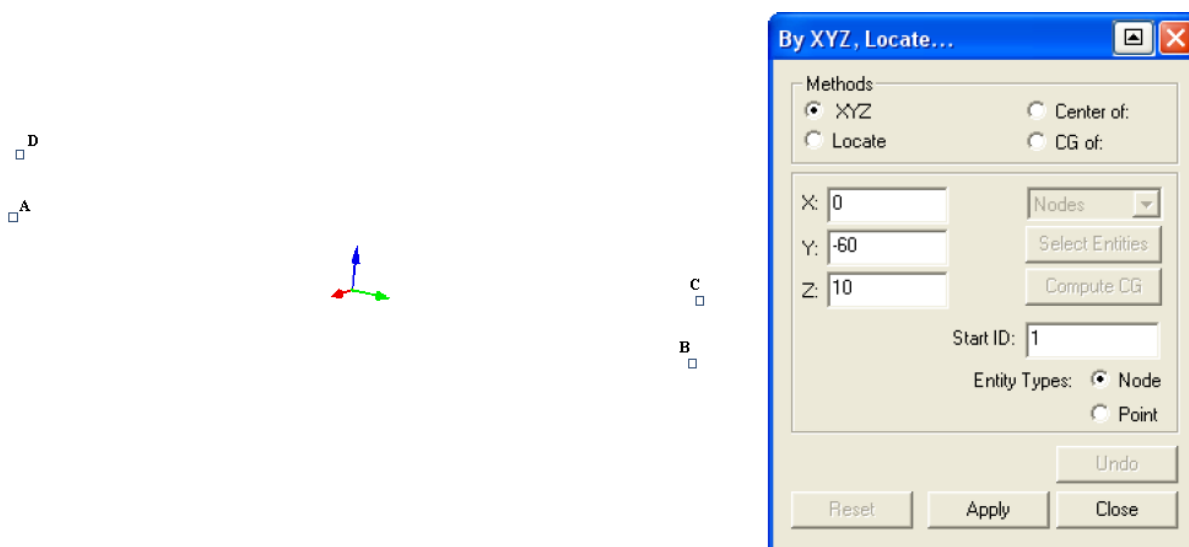
- „Model Window“ je hlavní část pracovní plochy, která zabírá největší prostor a používá se pro vykreslení modelu,
- „Menu“ - což je nástrojové menu,
- „Tool Bars“ - která představuje lištu už s jednotlivými příkazy,
- „Context List“ - je seznam s kontexty (souvisejícími programy),
- „Explorer“ - je průzkumník s přehlednými CAD daty
- „Sub Model Explorer“ - primárně používán jako průzkumník s pod modely
- „Console Window“ - je okno konzoly programu, pomocí kterého program komunikuje s uživatelem a vizualizuje jednotlivé modelovací úkony.



Obrázek č. 12 Uživatelské rozhraní Visual-Mesh V4.0 [8]

Jako názorný příklad tvorby modelu jsem si vybral jednoduchý T spoj skládající se ze dvou desek, který bude koutově svařen pomocí jedné housenky. Spodní svařovaný plech bude mít rozměry 60 x 200 x 10 a vrchní plech bude o rozměrech 50 x 200 x 10.

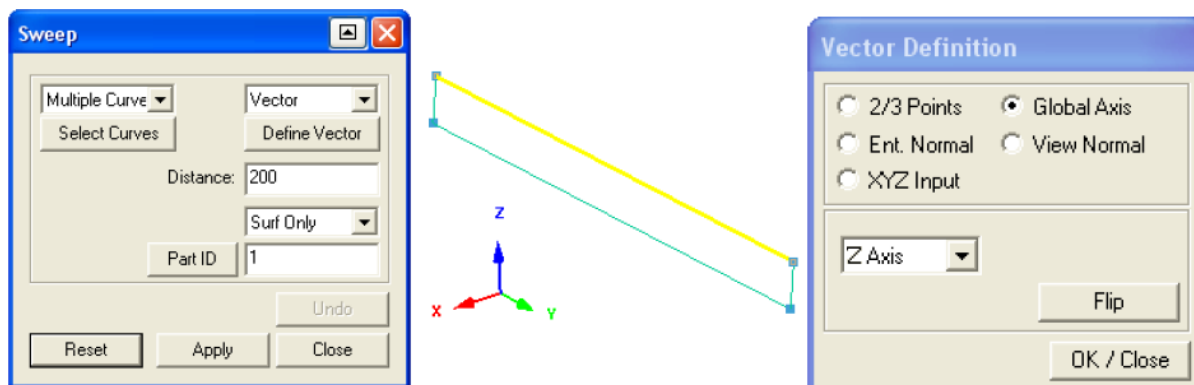
1. Tvorba bodů (Node_By XYZ, Locate) – Body se při kreslení zadávají v pravotočivém souřadném systému x, y, z. Na obrázku č. 13 je nabídka pro tvorbu bodu s konkrétním příkladem vytvořeného bodu o souřadnicích [0, -60, 10] odpovídající souřadnicím [X, Y, Z] včetně vykreslení ve vykreslovacím okně. Červeně označena osa x, zeleně y a modře z, tudíž tímto příkazem došlo k vykreslení bodu D.



Obrázek č. 13 Tvorba bodů [8]

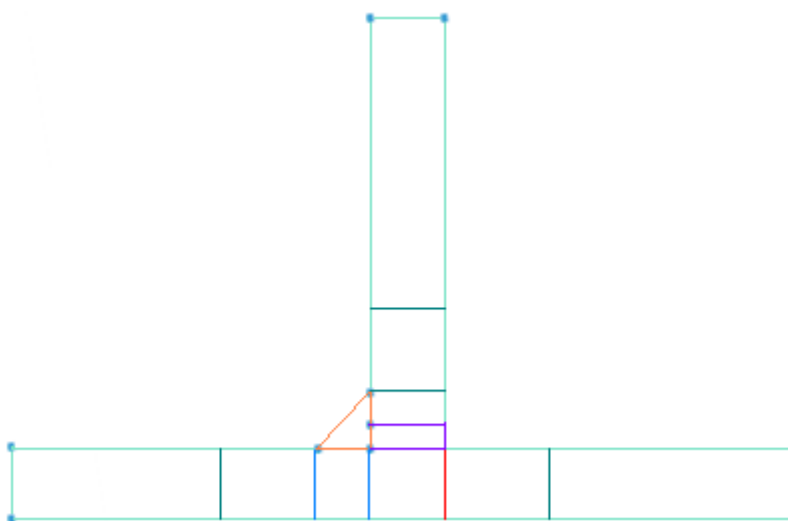
2. Křivka, čára (Sketch)- Vybráním příslušných bodů a potvrzením dojde k propojení křivkou. Např. přímku mezi body A, a B- označíme body A, a B, nebo naopak a dvojím potvrzením pomocí prostředního tlačítka na myši dojde vytvoření čáry.
3. Plocha- možností jak ve Visual-Meshi vytvořit plochu je mnoho. Nejčastějšími způsoby tvorby plochy jsou:
 - a) Vybráním pomocí dvou přímek (Surface_Blend(spline))- například vybráním spojnic mezi body A, a B a mezi body C, a D. Před a po označení druhé spojnice bodu musí dojít k potvrzení funkcí Apply, nebo prostředním tlačítkem na myši. Máme-li správně vybrány dvě příslušné přímky a následným potvrzením by mělo dojít k vytvoření plochy, která bude označena primárně programem jako „Part 201“. Označení lze dle vlastní libosti měnit. Označování pomocí Partu je výhodné pro následující rychlý výběr.
 - b) Vybráním a tažením ve směru (Surface_Sweep (Drag))- tento způsob tvorby plochy je dle mého posouzení snazší. Vybereme a potvrdíme přímku (např.

spojnici bodu C a D). Do kolonky „Distance“ napíšeme vzdálenost tažení přímky (tedy velikost 10 mm) a při potvrzení náš program vybědne k definování vektoru. Zaškrtnutím funkce „Global Axis“ a zadání směru tažení přímky (tedy směr z) a následným potvrzením opět dojde k vytvoření téže plochy, jako tomu je popsáno ve způsobu a). (viz obrázek č. 14 Tvorba plochy)



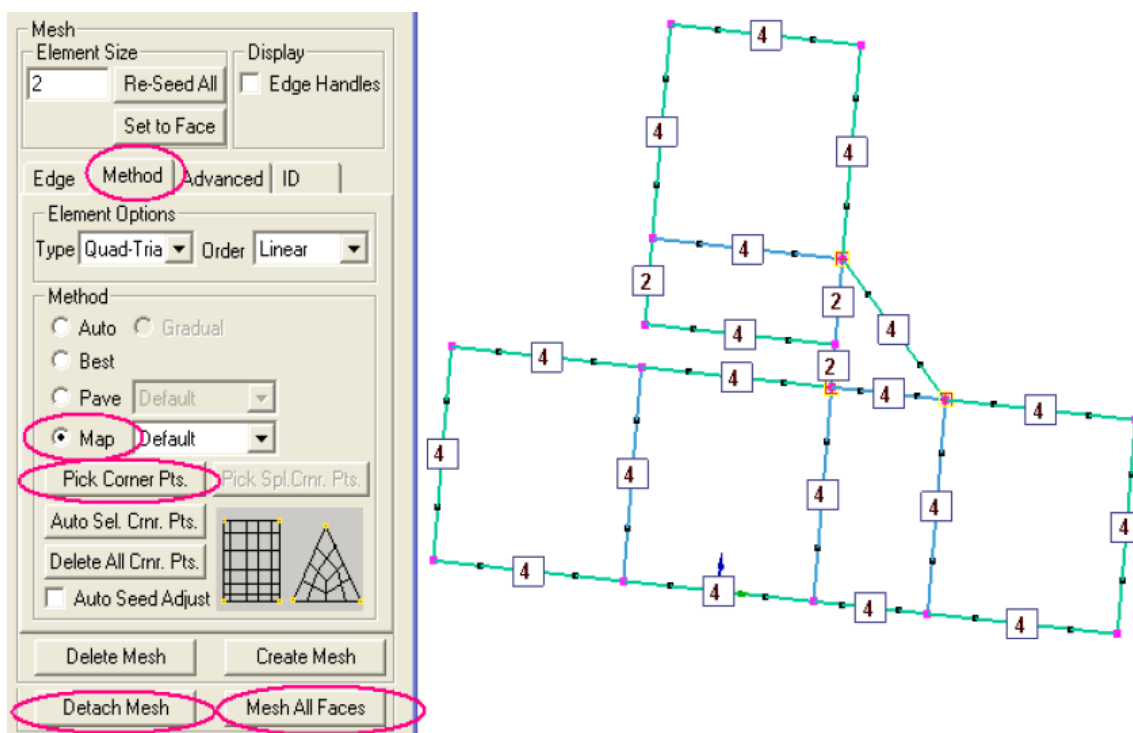
Obrázek č. 14 Tvorba plochy [8]

4. Pro zjednodušení a tvorbu modelů je vhodné používat funkci „Node transform“ (Node_Node transform), která umožňuje kopírovat a přenášet body o určitou vzdálenost. Pomocí této funkce, rovněž taky funkcí popsaných v bodech 1. až 3. a mnoha dalších funkcí vykreslíme desky svarového spoje, včetně oblastí, které budou simulovat svarový kov. Před samostatnou diskretizací je vhodné pro přesnější výpočet rozdělit jednotlivé oblasti svarového spoje na drobnější plochy, tak jako tomu je na obrázku č. 15. Do těchto ploch v následném kroku vytvoříme 2D síť.



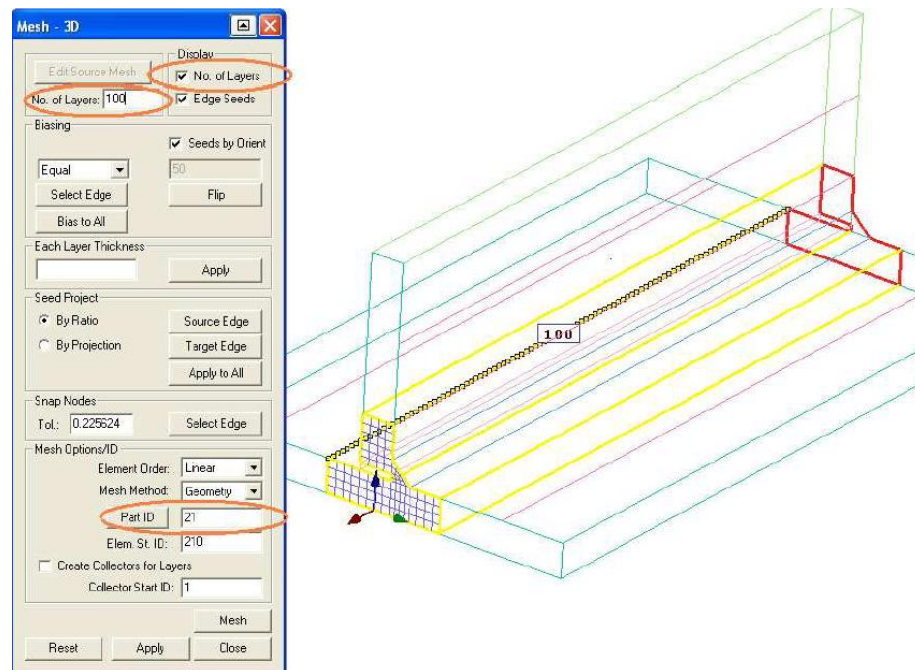
Obrázek č. 15 2D nákres svarových desek [8]

5. Tvorba 2D sítě (2D_Topo mesh)- Vybráním příslušné plochy pomocí partů a potvrzením lze pomocí mnoha metod vygenerovat různé možnosti 2D sítě. Nejčastěji, tak jako tomu je na obrázku č. 16. se používá funkce „Map“. Na jednotlivých hranách ploch je možno zadat počet elementů. Po vybrání počtu prvků, metody vysítování a následném potvrzení dojde k vytvoření 2D sítě s defaultně nastaveným partem 2**, který lze změnit. Viz obrázek č. 16.



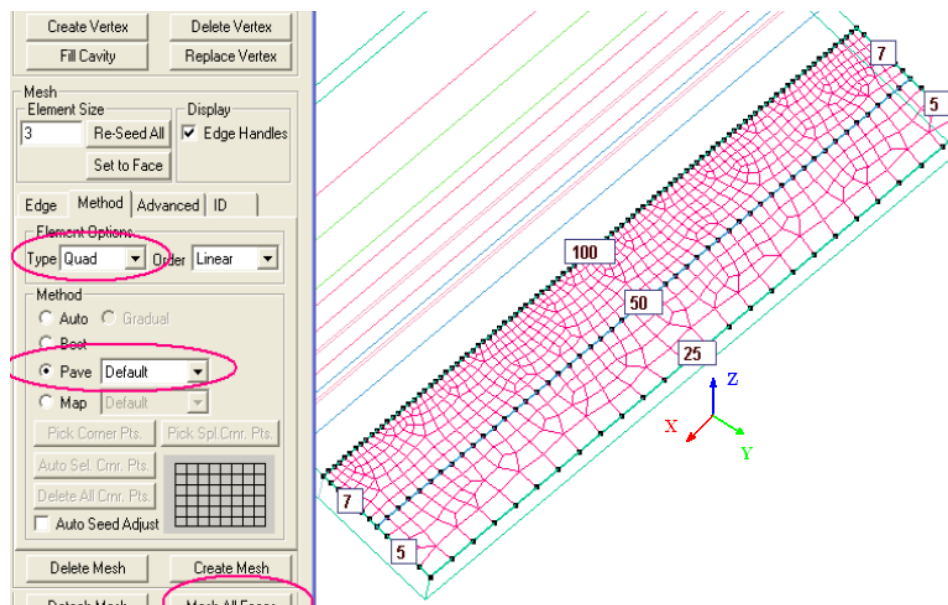
Obrázek č. 16 Tvorba 2D sítě [8]

6. Tvorba 3D sítě (3D_Swep (drag))- 3D mříž se ve Visual-meshi kreslí tažením 2D sítě, přičemž délka taženého elementu by měla být v rozmezí 3 až 10 násobku základny podstavy, přičemž nutnou podmínkou je, aby velikost elementu ve 3 směru byla odpovídající rychlosti svařování a to z důvodů rovnoměrnějšího rozdělení tepelného výkonu ve směru tažení, jinak pohyb tepelného zdroje nebude plynulý. Příkazem „Swep drag“ vybereme pomocí partu příslušnou 2D mříž a tažením ji protáhneme o zadanou vzdálenost (v našem případě 200 mm) ve třetím rozměru, rovněž zadáme počet elementů na danou taženou délku, tak jak tomu je na obr. č. 17. Po potvrzení pak vznikne 3D síť, která bude defaultně nazvaná partem 301, název partu lze pochopitelně opět měnit.



Obrázek č. 17 Tvorba 3D sítě [8]

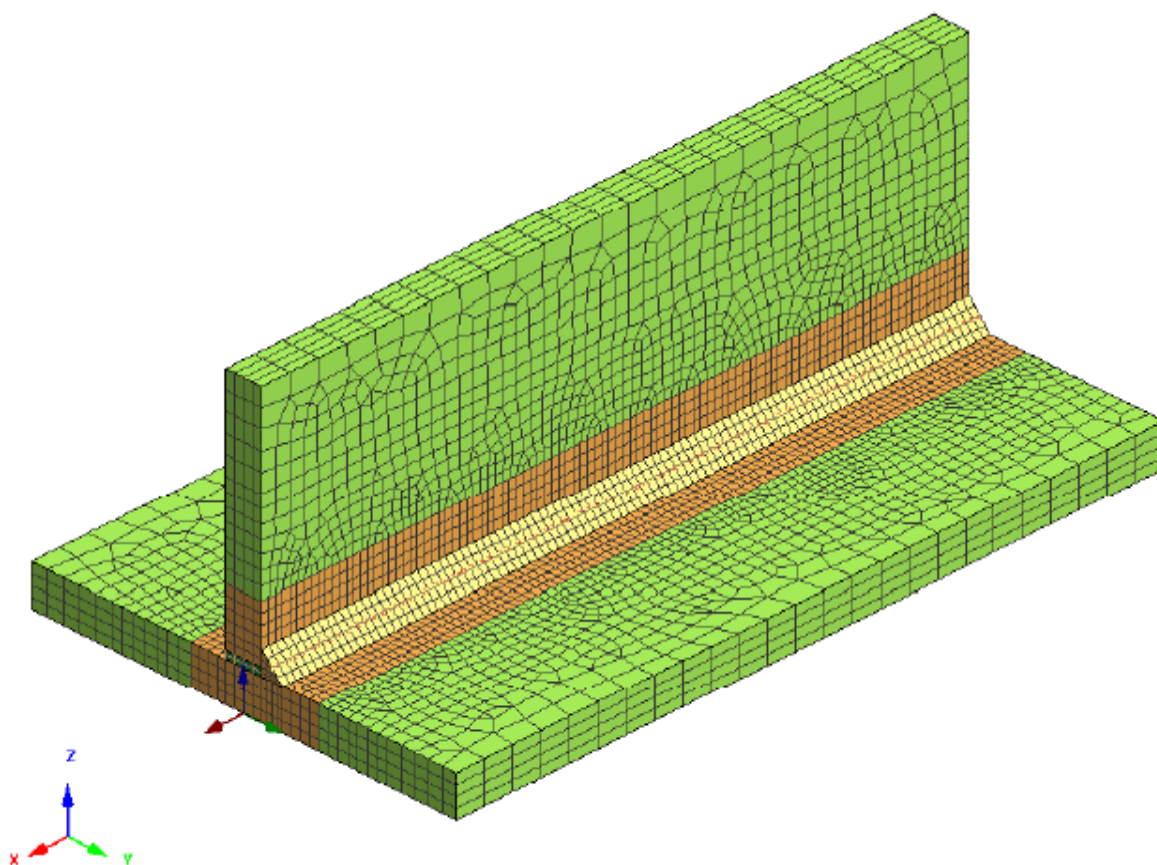
7. Při dokončování 3D sítě do celého objemu svarových desek je výhodné počet elementů se vzrůstající vzdálenosti od místa svaru redukovat, tuto redukci si můžeme dovolit, protože tak kvalitativně přesné výsledky na koncích svarových desek již nejsou potřebné. Tímto krokem docílíme zrychlení doby výpočtu. Redukce a doplnění 3D sítě do celého objemu svarových desek je nastíněná na obrázku č. 18. Nejdříve vytvoříme plochu s 2D sítí a tu pak pomocí funkce „Sweep drag“ vytáhneme do třetího rozměru, čili směru z.



Obrázek č. 18 Redukce elementů [8]

Kompletní vzorový model T spoje je na obrázku č. 19. Po dokončení kreslení je praktické vymazat všechny náčrty, tím je myšleno všechny volné body, čáry, plochy, 2D sítě. Dále je potřeba spojit uzly pomocí funkce „Checks_Coincident Nodes“, tímto dojde k sjednocení uzlů v zadané vzdálenosti. Přičemž zadaná vzdálenost pro spojení uzlu musí být menší, než je velikost nejmenšího elementu. Ve zbylých partech (grupech) pak zůstane:

- kompletní 3D model, který je vhodné nazvat „3D“,
- 3D model dolní desky, vhodné nazvat „down“,
- 3D model horní desky „upper“,
- 3D model svaru a mezery „Gap“ a „Beat“.

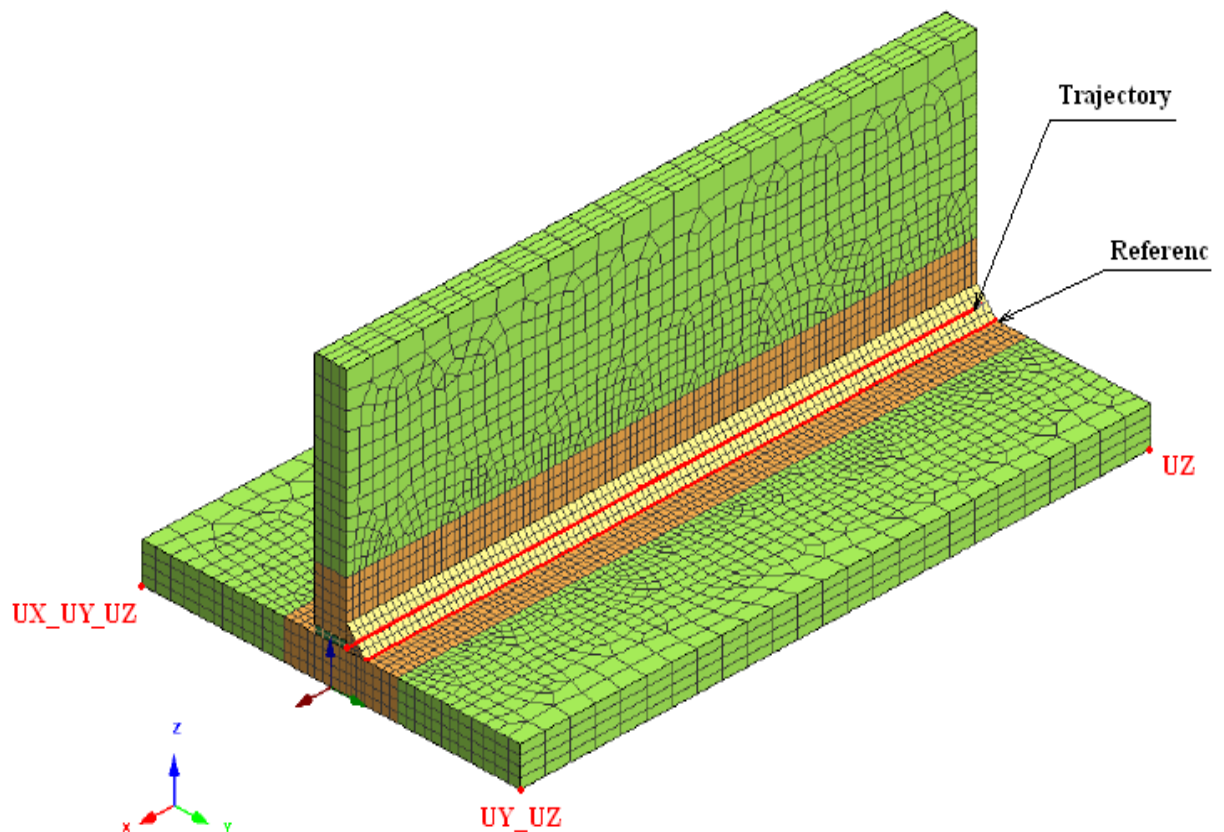


Obrázek č. 19 3D model T svaru [8]

Tím, ale práce v modelovacím programu Visual-mesh nekončí, program Sysweld k numerickému výpočtu svařování potřebuje následující data, které je nutno do modelu zachytit a označit je jako collectory:

- trajektorii a referenční přímku („Trajectory“ a „Reference“)- definováním trajektorie a reference určíme popis pohybu zdroje tepla, včetně nastavení polohy svařovací pistole (viz obrázek č. 20);

- okrajové podmínky pro uchycení svařovaných dílů („Clamping Conditions“), pro volné uložení platí metoda postupného uvolňování (viz obrázek č. 21.) kde:
 - UX_UY_UZ... posuvu je zabráněno ve všech 3 směrech,
 - UY_UZ... posuvu je zabráněno ve směru x a y,
 - UZ.... posuv je znemožněn pouze ve směru x.
- obálku- 2D element („Surface“), čili definovat možné přestupy tepla z materiálu do okolí. Ve Visual Meshi je k tomuto určen příkaz (2D_Extract from 3D Mesh);
- startovací bod a konečný bod na trajektorii a referenční přímce („Start node“ a „End node“);
- startovací 1D element na trajektorii a referenční přímce („Start Element“).



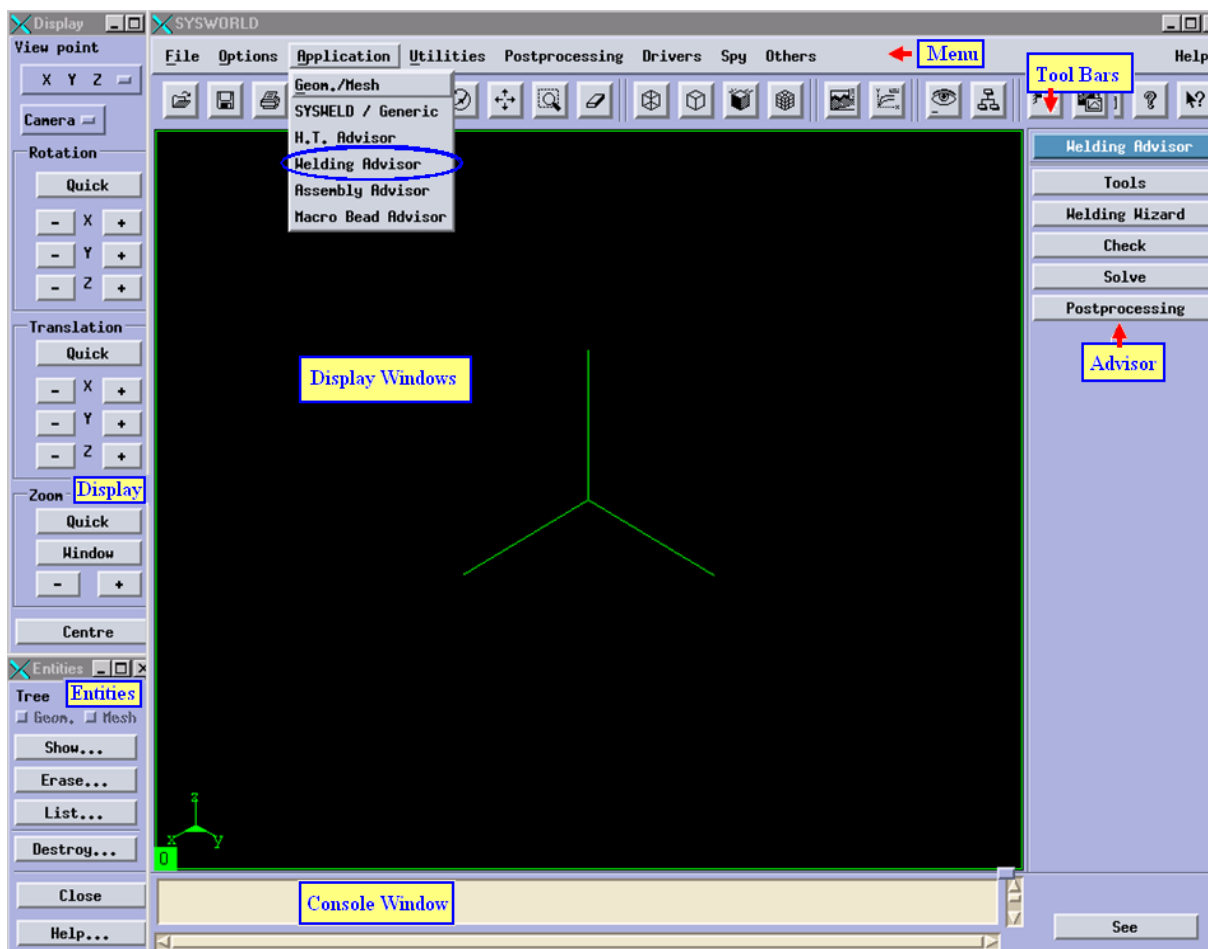
Obrázek č. 20 Znáznornění trajektorie, reference a okrajových podmínek pro uchycení [8]

Takto vytvořený model je potřeba uložit v zadaném tvaru s příslušnou koncovkou. Například „*.DATA1.ASC“ přes (File_Save as...).

1.2.2 Příklad numerické simulace T- spoje v programu Sysweld

Vytvořený model T svarového spoje v programu Visual-Mesh se dále použije pro vlastní numerickou simulaci procesu svařování, samostatná simulace je realizována na pozadí programu Sysweld, který rovněž nabízí společnost Esi Group. Uživatelské rozhraní programu Sysweld je zachyceno na obrázku č. 21, na kterém se zleva nachází:

- „Display“- představuje nástroj pro ovládání vizualizačního okna;
- „Entities“- je nástroj pro práci s entity;
- „Menu“- nástrojové menu;
- „Tool bars“- což je lišta se základními příkazy;
- „Display Windows“- je hlavní vizualizační okno;
- „Console Windows“- je okno přes které program komunikuje s uživatelem;
- „Advisor“, v případě svařování „Welding Advisor“- představuje nástrojové menu pro svařovací simulace (spouštění přes: Application_Welding Advisor).



Obrázek č. 21 Uživatelské rozhraní programu Sysweld [11]

Postup numerické simulace v programu Sysweld se skládá z následujících kroků:

1. definování a ladění tepelného zdroje,
2. definování parametrů výroby,
3. spuštění výpočtu vlastní numerické simulace,
4. vizualizace vypočtených výsledků.

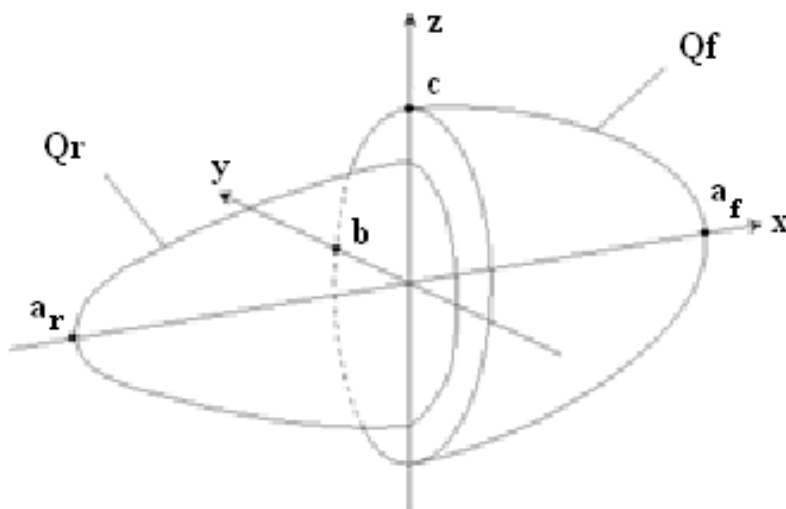
1. Definování a ladění zdroje tepla

V programu Sysweld funkci Application_Welding Advisor_Tools_Heat input fitting si vytvoříme 3D síť T svarového spoje, přiřadíme ji materiál, který by měl odpovídat materiálu, na kterém bude simulace probíhat, a naladíme si potřebný tepelný zdroj. Pro metody svařování MIG/MAG používáme jako zdroj tepla „Double ellipsoid“, či li dvojitý elipsoid, který je popsán rovnicemi (5) a (6), kde v souřadném systému x, y, z:

- Q_f a Q_r ... znamená poměr rozdělení skutečného tepelného příkonu do předního Q_f a zadního Q_r elipsoidu, (například kombinace $Q_f=1,2$ a $Q_r=0,8$),
- a_f , a_r , b , c ... znamenají rozměry elipsoidů, které jsou patrné z obrázku č. 22, kde je dvojitý elipsoid vykreslen.

$$Q(x, y, z) = Q_f \exp\left(-\left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \quad (5)[10]$$

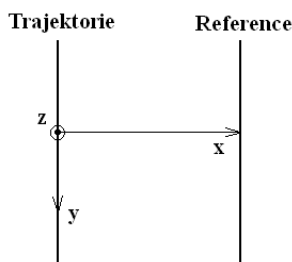
$$Q(x, y, z) = Q_r \exp\left(-\left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \quad (6)[10]$$



Obrázek č. 22 Nákres dvojitého elipsoidu [10]

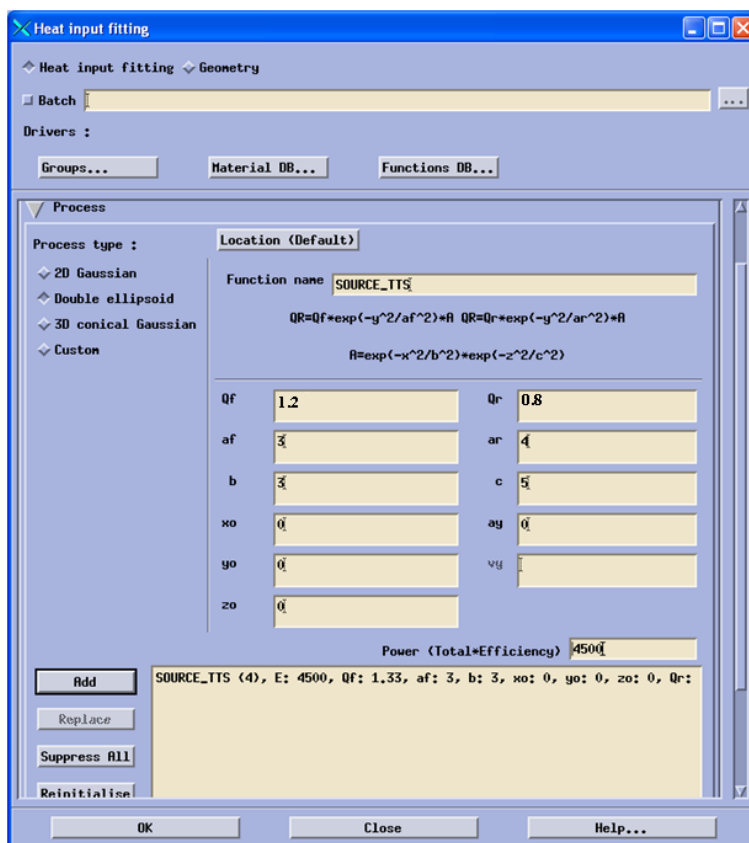
V případě, že ustanovení trajektorie a reference odpovídá obrázku č. 23 a zároveň když střed dvojitého elipsoidu leží na trajektorii, pak není potřeba používat další souřadnice pro popis svařovacího zdroje tepla. V případě, že tomuto tak není, je potřeba zadat následující souřadnice, které program umožňuje zadat:

- x_0, y_0, z_0 ... posunutí středu dvojitého elipsoidu ve směrech x, y a z od zvolené trajektorie,
- ay ... natočení dvojitého elipsoidu v rovině $x-z$.



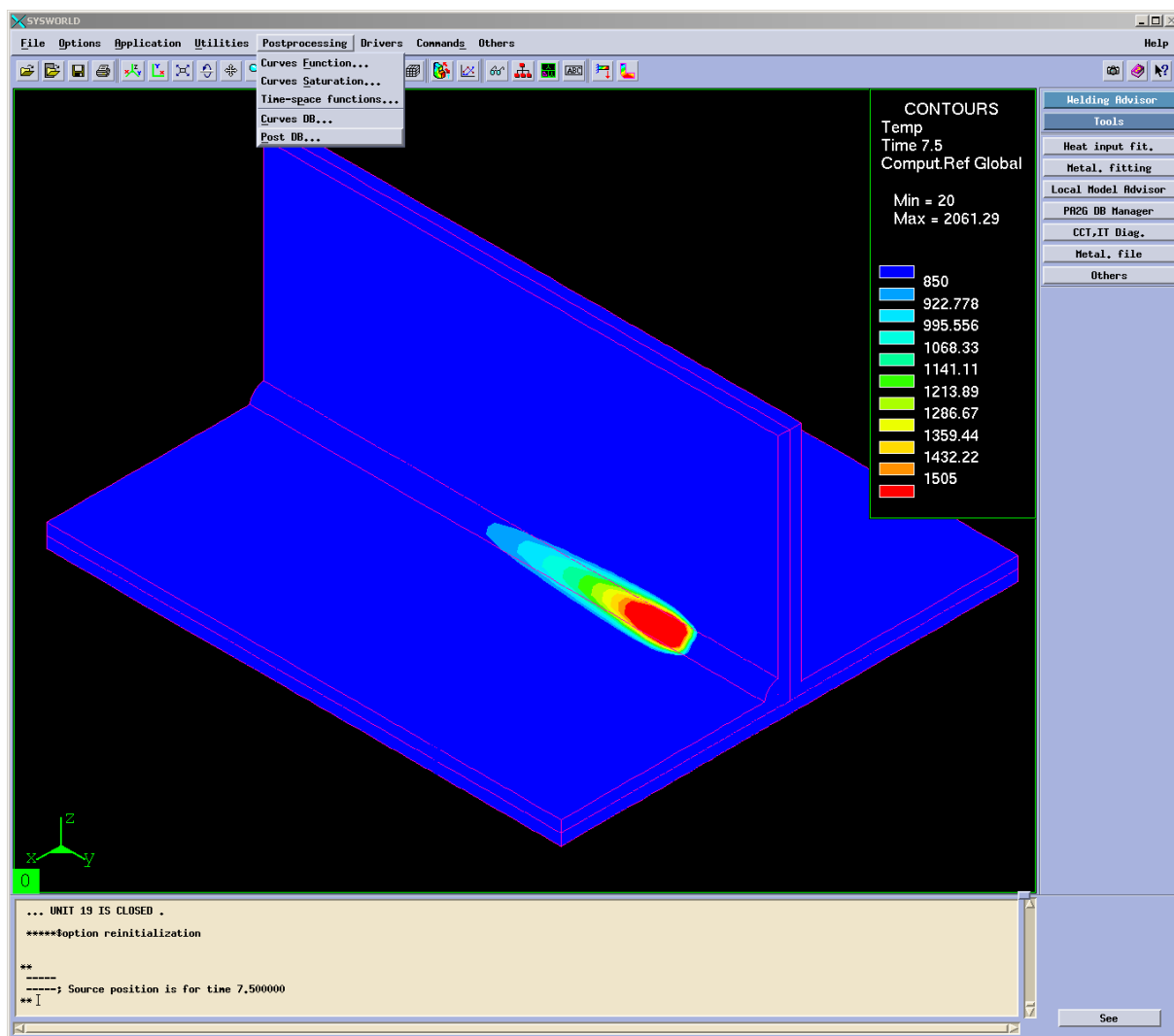
Obrázek č. 23 Ustanovení trajektorie a reference

Nakonec je potřeba zadat skutečný příkon svařování, ten je dán vztahem (4). Parametry dvojitého elipsoidu zadaného do modulu pro ladění tepelného zdroje, je na příkladě znázorněn na obrázku č. 24.



Obrázek č. 24. Náhled do programu při modelování zdroje tepla [11]

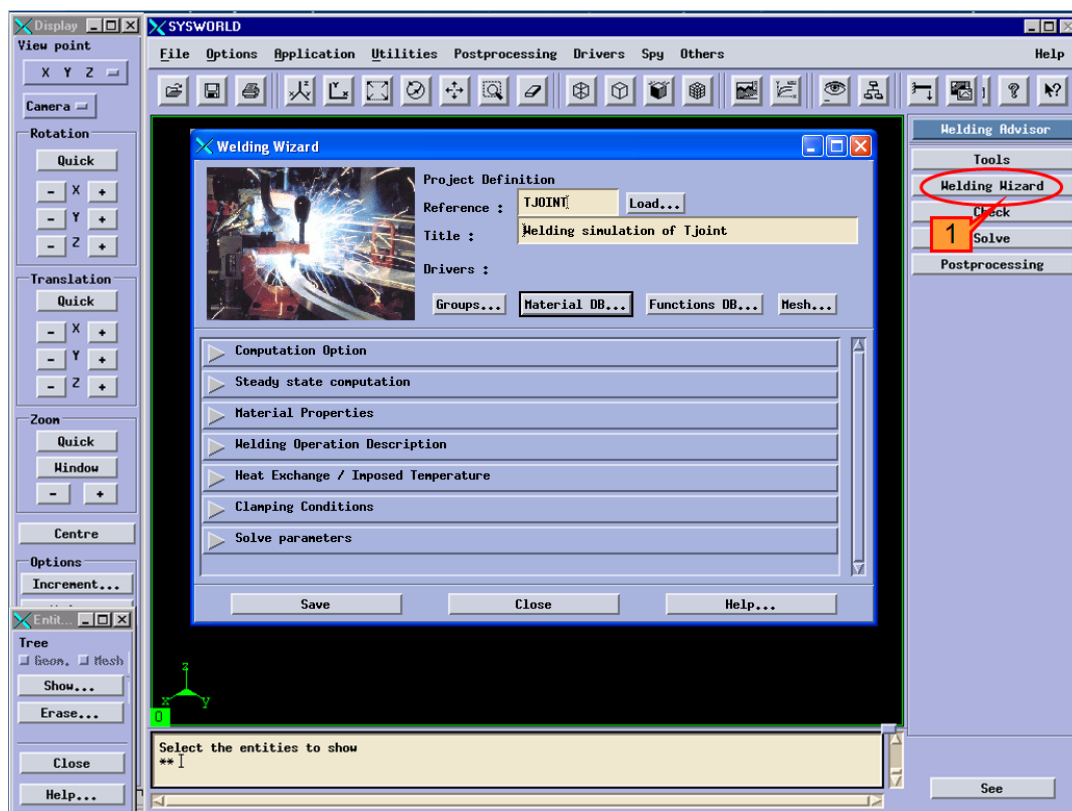
Před samostatným vykreslením namodelovaného zdroje tepla je potřeba v dalším kroku zadat rychlost svařování a teplotu okolí a výchozí strukturní vlastnosti. Pak možný vykreslený zdroj tepla v určitém časovém okamžiku, aplikovaný na příkladě svařování T spoje je znázorněn na obrázku č. 25. V případě, že nám tento namodelovaný zdroj tepla vyhovuje, pak je tento zdroj potřeba pro následnou numerickou simulaci uložit s příponou *.fct.



Obrázek č. 25 Namodelovaný zdroj tepla [11]

2. Definování parametrů výroby

Parametry výroby je myšleno blíže definovat proces svařování. Výchozí formulář pro zadávání vstupních dat pro následnou numerickou simulaci je zobrazen na obrázku č. 26 (viz Application_Welding Advisor_Welding Wizard). Na obrázku: kolonku název (reference) je potřeba vždy vyplnit, poznámka (Title) již povinná není, ale doporučuje se zadávat.



Obrázek č. 26 Formulář pro zadávání vstupních dat pro numerickou simulaci svařování [12]

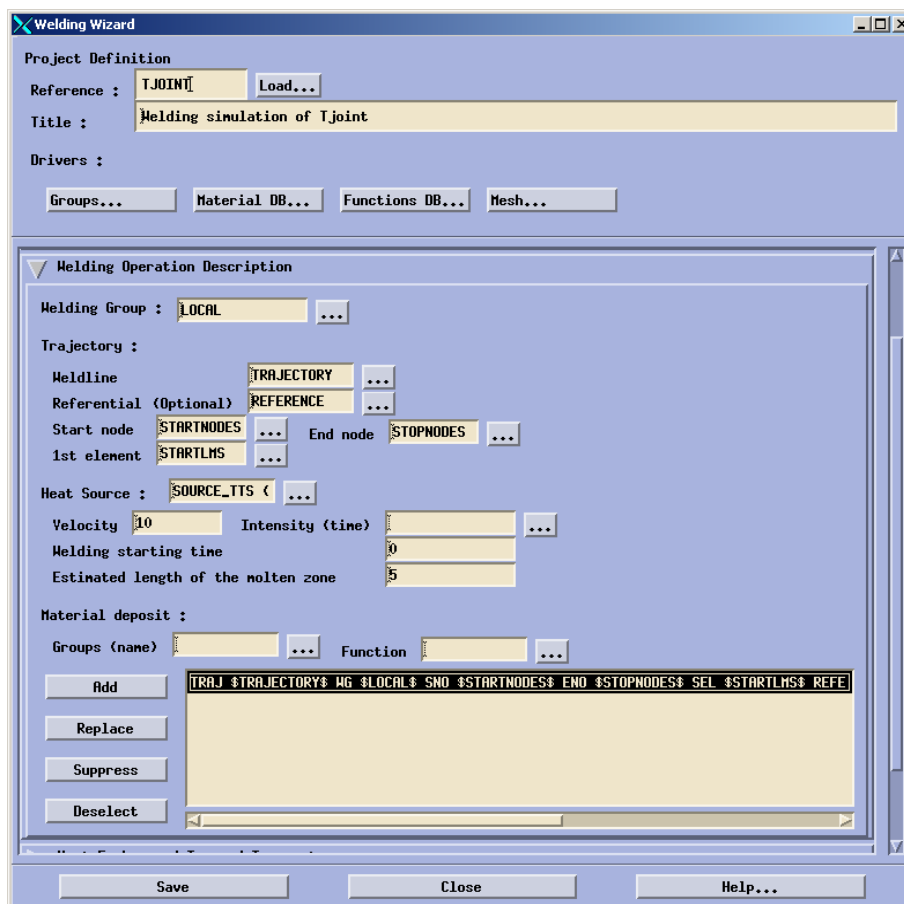
Následně je nutno:

- a) přiřadit jednotlivým svařovaným komponentům materiál výběrem z omezené nabídky materiálů- výběr pomoci funkce „Materiál DB“;
- b) nahrát soubor s předdefinovanými funkcemi- výběr pomoci „Function DB“;
- c) nahrát model se všemi potřebnými náležitostmi, pomoci funkce „Mesh“;

Po zadání těchto vstupních dat můžeme přikročit k vyplňování jednotlivých podformulářů:

- a) „Computation Option“, neboli možnosti výpočtu, v nabídce ponecháme přednastavenou funkci rovnovážného stavu výpočtu, který počítá s lineární dráhou svaru, což je vyhovující pro vzorový T spoj;
- b) „Material Properties“, neboli materiálové vlastnosti, program v této nabídce vybízí k zadání konkrétního materiálu k jednotlivým komponentům svařované konstrukce, zadávají se jak mechanické vlastnosti dané oceli, tak i její tepelné vlastnosti;
- c) „Welding Operation Description“, neboli popis svařovacího procesu (viz obrázek č. 27). Program vybízí k přesnému zadání:
 - trajektorie dráhy svařovacího zdroje tepla,
 - referenční přímky,
 - počátečního a konečného bodu,

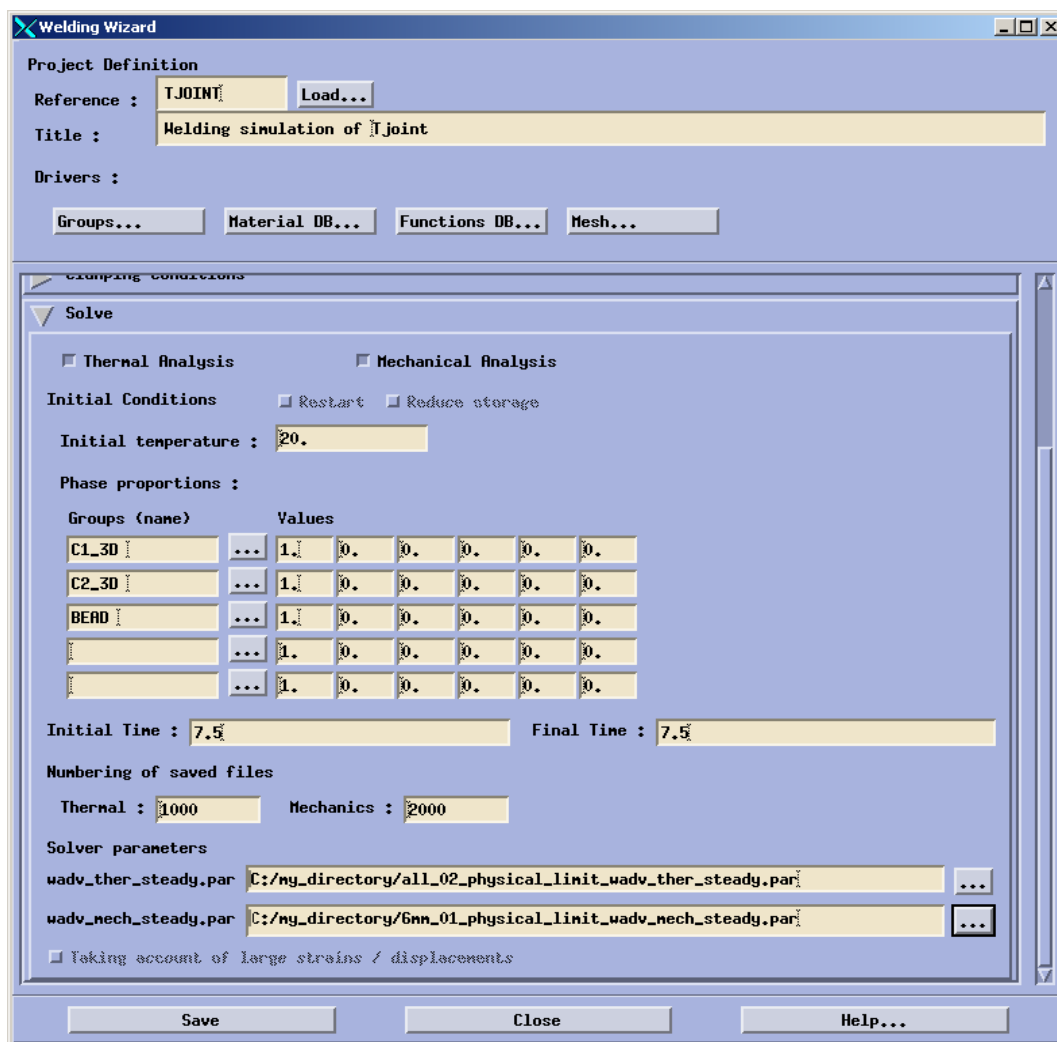
- počátečního 1D elementu,
- namodelovaného zdroje tepla,
- rychlosti svařování,
- čas zahájení svařování a odhadovanou délku roztavené zóny



Obrázek č. 27 Zadávání svařovacích parametrů v Sysweldu [12]

- d) „Heat Exchange / Imposed Temperature“, neboli tepelná výměna a teplota okolí. Touto nabídkou program vybízí k vybrání 2D sítě- Surface, na které se uskuteční přenos tepla mezi 3D modelem a okolím. Dále pak program požaduje zadat počáteční teplotu okolí a funkci, která bude popisovat přenos tepla do okolí.
- e) Clamping conditions, neboli podmínky upnutí. Na vybraných grupách (bodech) stanovíme podmínky upnutí svařovaných desek.
- f) „Solve“- výpočet. Program požaduje upřesnit podmínky výpočtu, co vše bude předmětem výpočtu, zda postačí jen teplotní analýza, nebo bude zároveň požadována i mechanická analýza. Program pak vybízí k přiřazení počáteční struktury k jednotlivým komponentům svařované konstrukce a počáteční teplotu svařovaných komponentů. Dále program vyžaduje zadat počáteční a koncový čas výpočtu a ve

spodní části na obrázku č. 28 vybrat z nabídky parametry řešení pro teplotní a mechanickou analýzu.



Obrázek č. 28 Zadávání parametrů pro výpočet v programu Sysweld [12]

Po kompletním zadání a uložení těchto vstupních parametrů pro výpočet numerické simulace svařování se doporučuje před spuštěním vlastního výpočtu, zkontrolovat vstupní data vizualizací v hlavním okně, vykreslením bychom měli pomoci funkce „check“ zkontrolovat: všechny 3D objekty včetně svaru, trajektorii, referenční přímku, startovací a konečný bod, startovací element, obálku symbolizující kontaktní stykové plochy s okolní atmosférou, okrajové podmínky statické (body uchycení) a namodelovaný tepelný zdroj.

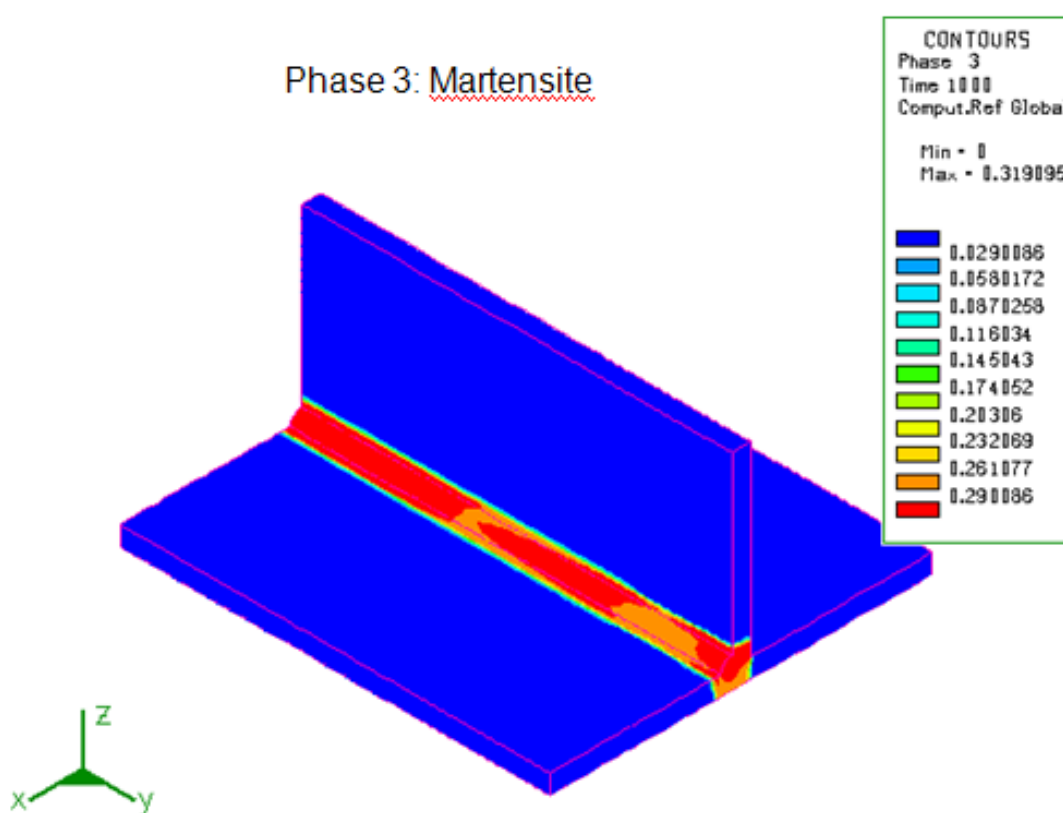
3. spuštění výpočtu vlastní numerické simulace

Příkazem „Application_Welding Advisor_Solve“ vytvoříme soubor s názvem *_SOLVE.DAT, který následně pomocí příkazu „File_Load_.DAT“ otevřeme a tím spustíme vlastní výpočet numerické simulace svařování.

4. Vizualizace vypočtených výsledků

Příkazem „Application_Welding_Advisor_Postprocessing_display“ otevřeme výstupní soubory vypočtené numerickou simulací, otevřením souboru pod názvem *.Post_1000.fbd otevřeme vypočtené výsledky z teplotně- metalurgického řešení jako jsou například:

- rozložení teplotního pole během svařování (Temperature),
- rozložení rychlosti ochlazování (Temperature Rate),
- rozložení tepelné energie (Heat Power),
- rozložení jednotlivých strukturních složek po svaření- obrázek č. 29. ukazuje rozložení martenzitu po svařování,



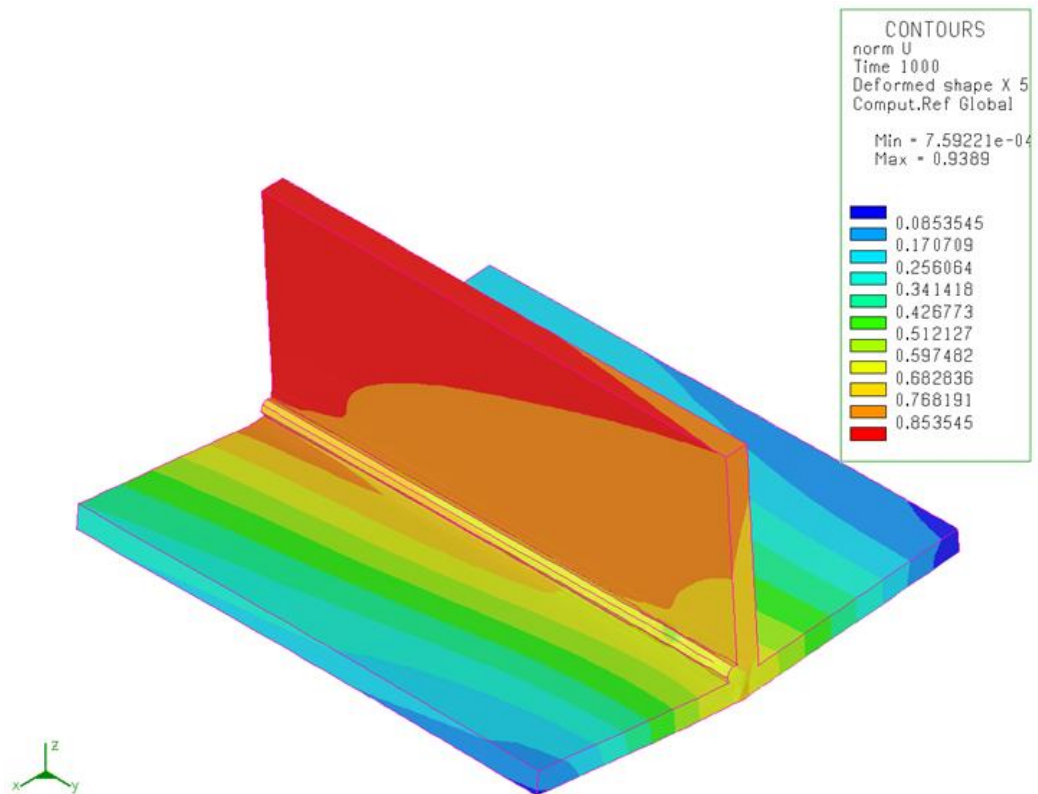
Obrázek č. 29 Rozložení martenzitu po svařování [13]

- velikosti zrn po svařování, atd.

Otevřením souboru *.Post_2000.fbd otevřeme vypočtené výsledky z mechanického řešení, jako například jsou:

- deformace po svařování- viz obrázek č. 30,
- predikci zpevnění,
- termickou deformaci

- zbytkové napětí po svaření,
- hustota deformační energie, atd.



Obrázek č. 30 Deformace po svaření [13]

Spuštěním dodatečného modulu „Hardness Wizard“, který se nachází v nabídce (Application Welding_Advisor Hardness_Wizard) můžeme dopočíst průběhy rozložení tvrdosti ve svařované konstrukci po svaření. Modul vyžaduje pro výpočet tvrdosti zadat příslušný projekt, pro který se bude tvrdost počítat, dále pak je nutno zadat chemické složení oceli a zadat počáteční tvrdosti fázi (bainitu a martenzitu). Výhodou tohoto modulu vidím v tom, že po výpočtu se automaticky provedou funkce convert (přepočet) a averaging (průměrování).

2. Návrh numerických modelů

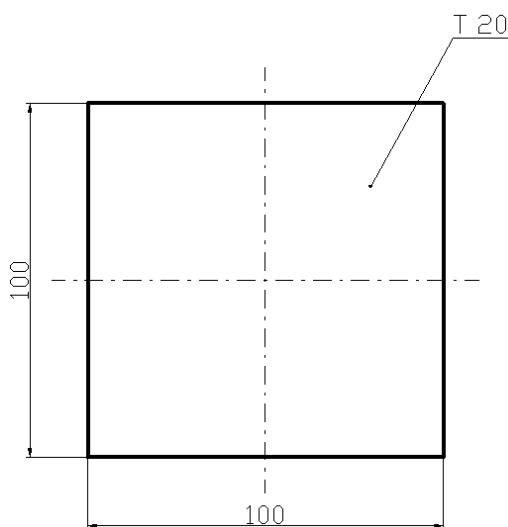
2.1 Návrh numerického modelu pro tepelné zpracování a parametry tep. zpracování

První část experimentu se bude zabývat tepelným zpracováním vzorků o rozměrech (100 x 100 x 20) mm, rozměry vzorků jsou znázorněny na obrázku č. 31. Všechny vzorky jsou z oceli S355J0, toto označení odpovídá normě EN 10025-93, dle normy ČSN EN 10 027-2 je tato ocel nese označení 1.0553. Jde o ocel, která se používá pro svařované konstrukce a strojní součásti s vyšší mezí kluzu. Maximální hodnoty chemického složení této oceli v hmotnostních procentech:

- C= 0,2 %
- Mn= 1,60 %
- Si= 0,55 %
- P= 0,04 %
- S= 0,04 %
- N= 0,009 %

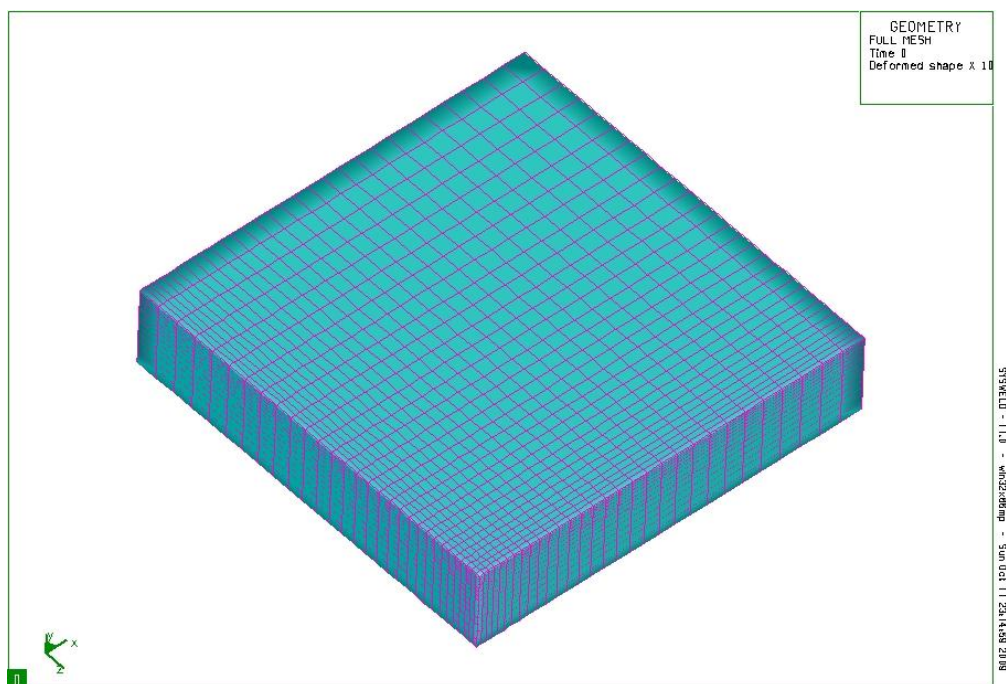
Mechanické vlastnosti oceli S355J0:

- Mez kluzu $R_e = 355$ MPa
- Mez pevnosti $R_m = 490$ MPa
- Tažnost $A_5 = 22$ %
- Nárazová práce - KV= 27 J - při teplotě 0 °C (J0)
- Tvrdost $HV_{max} = 222$



Obrázek č. 31 schéma vzorku pro tepelné zpracování

Pro numerickou simulaci tepelného zpracování byl navrhnout numerický model, který je zachycen na obrázku č. 32. Rozměry modelu díky symetrii podle všech tří os, odpovídají 1/8 experimentálního vzorku, tudíž rozměry modelu jsou 50 x 50 x 10.



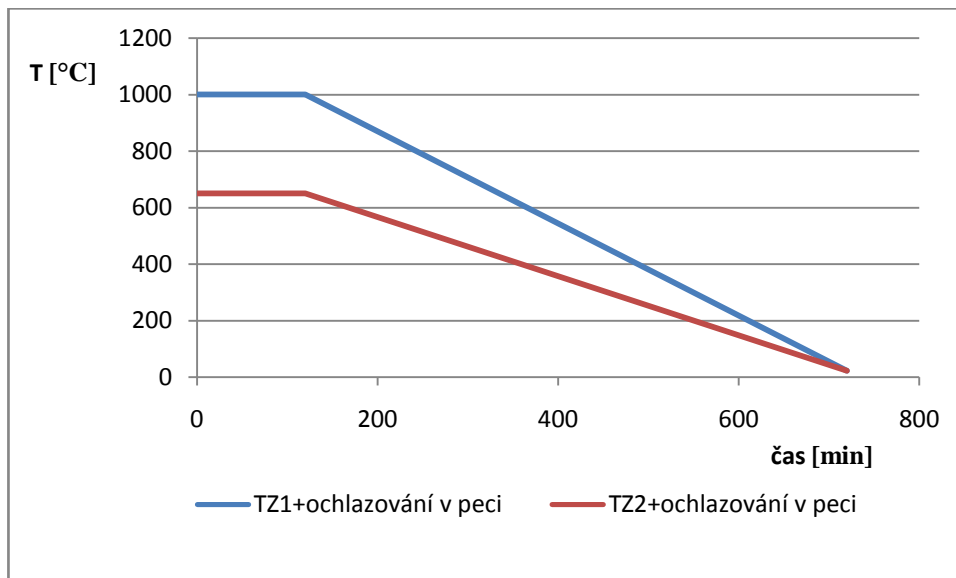
Obrázek č. 32 Model pro numerickou simulaci tepelného zpracování

Výše uvedený model byl použit pro numerickou simulaci tepelného zpracování, pro tepelné zpracování byly použity dva režimy a pět různých způsobů ochlazování. První režim tepelného zpracování (TZ1) odpovídá pomalému ohřevu na teplotu **1000 °C**, následuje výdrž na této teplotě po dobu 2 hodin. Druhý režim tepelného zpracování (TZ2) probíhá obdobně pomalým ohřevem na teplotu **650 °C** a rovněž následuje 2 hodinová výdrž na této teplotě. Proces ochlazování zkušebních vzorků z obou režimů tepelného zpracování probíhá v různých prostředích. Proces tepelného zpracování u jednotlivých vzorků je nastíněn v tabulce č. 3.

Tabulka č. 3 Režimy tepelného zpracování u jednotlivých vzorků [14]

Označení vzorku	Teplotní režim + ochlazování
1.	TZ1 + ochlazování na vzduchu
2.	TZ1 + ochlazování v peci
3.	TZ1 + ochlazování ve vodě
4.	TZ2 + ochlazování na vzduchu
5.	TZ2 + ochlazování v peci

Pro vzorky 2. a 5. je potřeba pro úplnost a pro numerickou simulaci nezbytnou podmínkou uvést průběh ochlazování u těchto vzorků v peci. Průběh obou ochlazování v peci je pro oba vzorky stejný, po 10 hodinách ochlazování v peci byla teplota obou vzorků 23 °C. Průběhy ochlazování v peci u vzorků č. 2. a 5. jsou na obrázku č. 33.

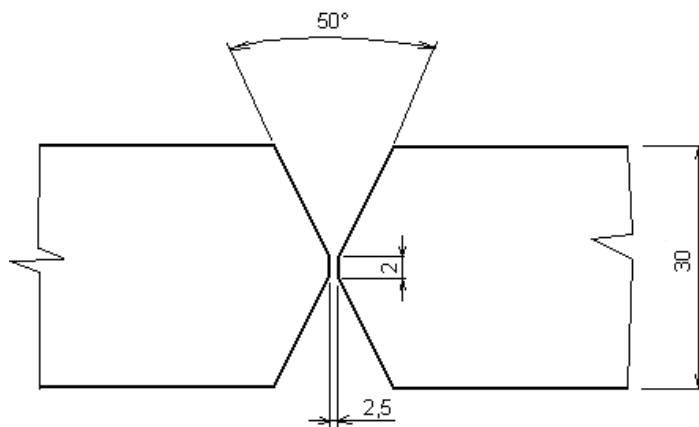


Obrázek č. 33 Průběhy tepelného zpracování u vzorků č. 2. a 5.

2.2 Návrh numerického modelu tupého zkušebního spoje pro svařování

Druhá část experimentu se týká numerické simulace svařování technologií 135. Experiment se prováděl na tupém X svarovém spoji o rozměrech svařovaných plechů (400 x 480 x 30) mm. Bližší specifikace k tomuto experimentu lze najít v pracích [17] a [18]. Úprava svarových ploch je znázorněna na obrázku č. 34. Materiál desek je jakostní ocel dle normy EN 10025-94 nese označení S355J2G3, dle normy ČSN EN 10027-2 je tato ocel nese označení 1.0570. Jedná se ocel, která se používá pro svařované konstrukce s vyšší mezí kluzu. Maximální hodnoty chemického složení této oceli v hmotnostních procentech:

- C= 0,2 %,
- Mn= 1,60 %,
- Si= 0,55 %,
- P= 0,035 %,
- S= 0,035 %.

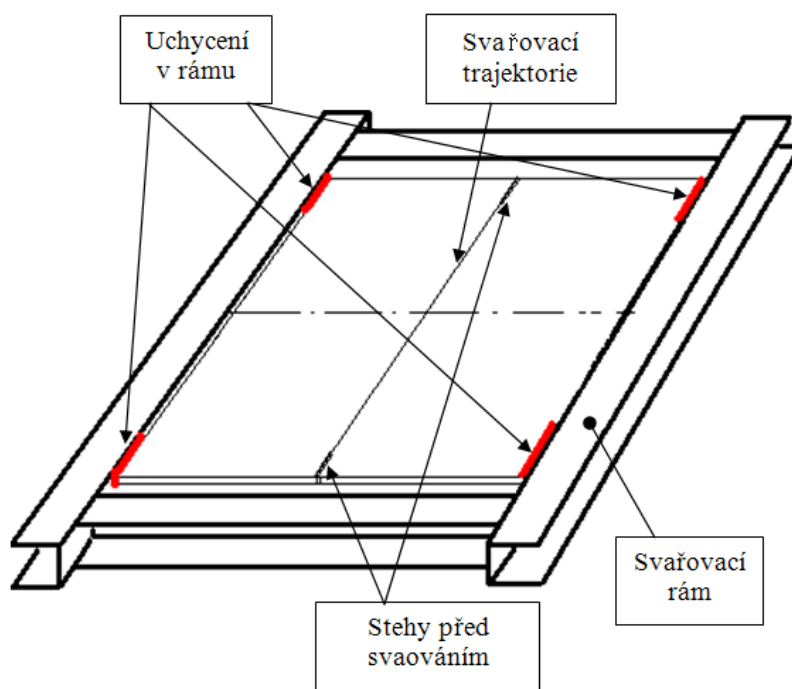


Obrázek č. 34 Úprava svarových ploch svarového spoje [15]

Mechanické vlastnosti oceli S355J2G3:

- Mez kluzu $R_e = 355 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti $R_m = 490 \text{ MPa}$
- Tažnost $A_5 = 20 \div 22 \%$
- Nárazová práce - $KV = 27 \text{ J}$ - při teplotě $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ (J0)
- Tvrdost $HV_{\max} = 222$

Schéma svařované konstrukce přistěhované 4 stehy k ocelovému rámu (U profilu) pro zajištění konstantních podmínek upnutí je znázorněno na obrázku č. 35. Ilustrační fotografie vlastní konstrukce před samostaným svařováním je na obrázku č. 36.

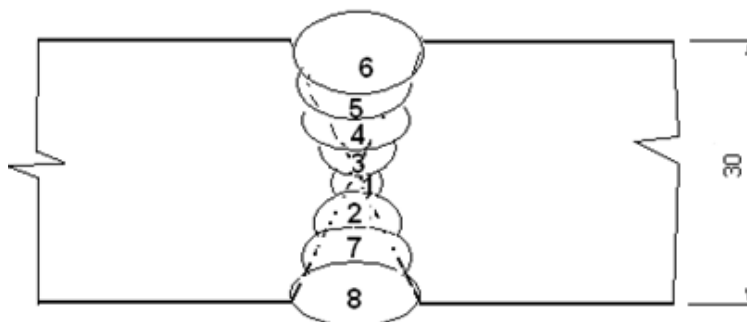


Obrázek č. 35 Schéma svařované konstrukce [15]



Obrázek č. 36 Ilustrační fotografie konstrukce před vlastním svařováním [15]

Svařování probíhalo bez předehřevu svarových ploch a to tak, že svarové úkosity byly postupně vyplněny 8 housenkami, tak jak je tomu schematicky naznačeno na obrázku č. 37. Jak již bylo výše řečeno, svařování probíhalo technologií 135, bez předehřevu svarových ploch, jako ochranný plyn byl použit směsný plyn o složení 82 % Ar, 18 % CO₂, dle normy ČSN EN ISO 14175 označen ISO 14175-M21-ArC-18, oxidační směsný plyn. Svařovací parametry jednotlivých svarových housenek jsou uvedeny v tabulce č. 4., kde je rovněž podle vztahu (4) dopočten nominální tepelný příkon každé svarové housenky. Jediným parametrem, kterým lze korigovat velikost tepelného příkonu, tudíž i velikost natavené oblasti v Sysweldu je ze vztahu (4) součinitel účinnosti svařovacího procesu. Proto, abychom docílili stejného natavení u jednotlivých housenek jako u reálného experimentu (viz makrostruktura svarového spoje), můžeme tento koeficient u každé housenky měnit v rozsahu dle tabulky č. 1. Jako přídatný materiál byl použit měděný drát OK 12.58 (chemického složení: C= 0,1 %, Mn= 1,1%, Si= 0,6%), průměru 1,2mm, který se běžně používá pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností do 500 MPa.

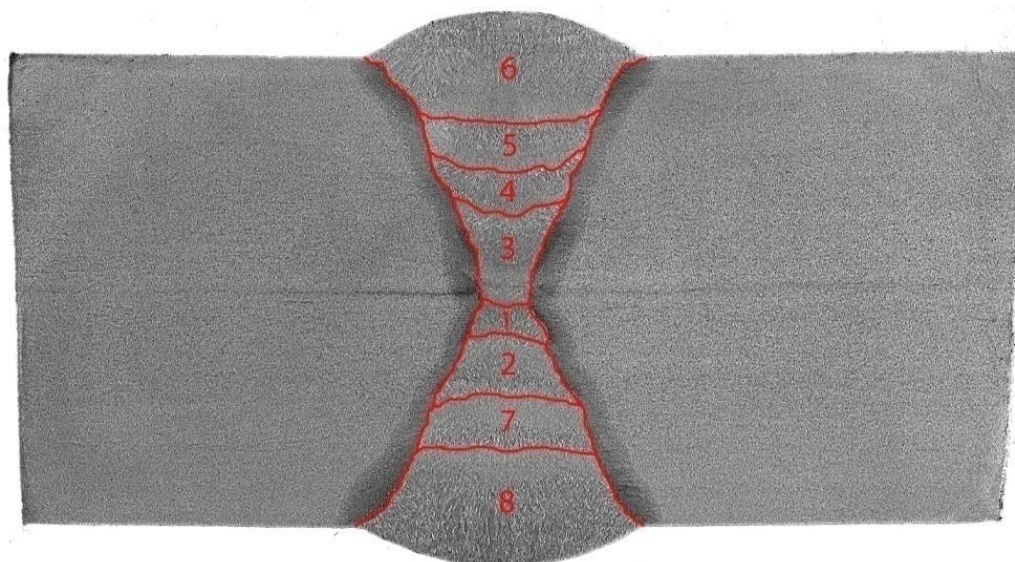


Obrázek č. 37 Schéma pokládání svarových housenek [15]

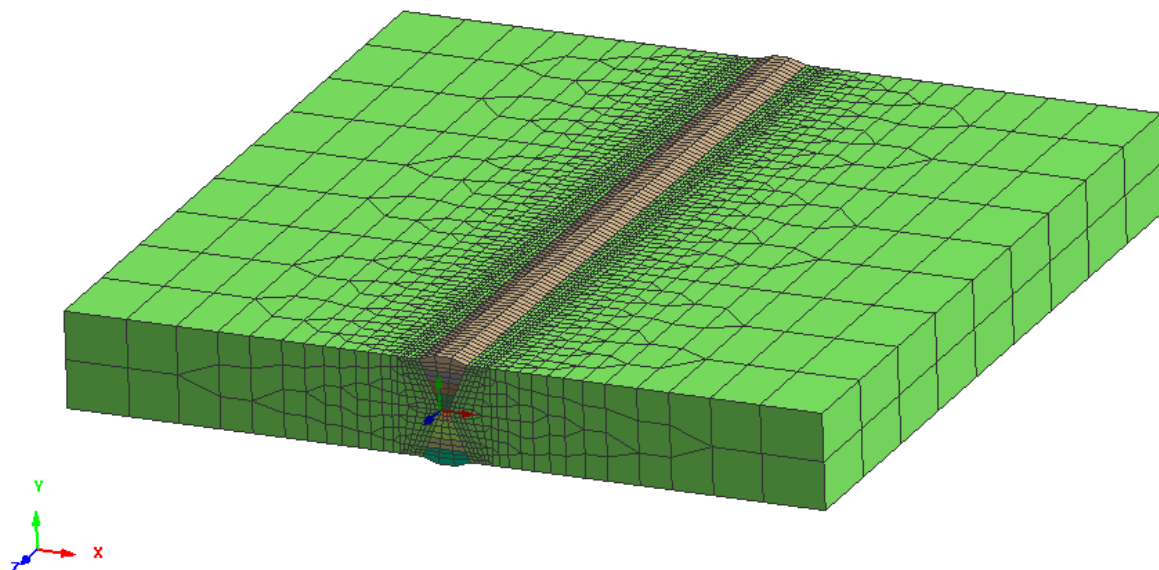
Tabulka č. 4 Svařovací parametry jednotlivých svarových housenek [15]

svar č.	I	U	t	v	Q _{nominální}
	[A]	[V]	[s]	[mm/s]	[J.mm ⁻¹]
1	143	16,2	740	2,0	1160
2	183	18,1	644	2,3	1440
3	197	17,8	478	3,1	1130
4	199	17,8	644	2,3	1540
5	191	19	673	2,2	1650
6	198	18,2	705	2,1	1720
7	216	18,4	689	2,15	1850
8	195	18,4	823	1,8	1990

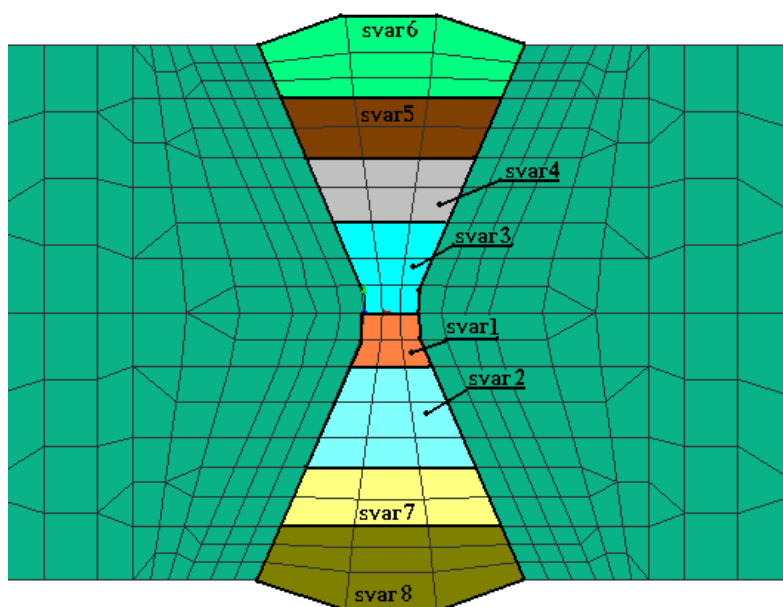
Makrostruktura svarového spoje po svaření při dvojnásobném zvětšení, s vyznačením jednotlivých vrstev svarového kovu je zachycena na obrázku č. 38. Jako leptadlo byl použit přípravek Nital. Numerický model pro vlastní numerickou simulaci procesu svařování tupého X spoje je znázorněn na obrázku č. 39. Na obrázku č. 40 je v detailu zachycena oblast numerického namodelování svarových housenek.



Obrázek č. 38 Makrostruktura svarového spoje po svaření [15]

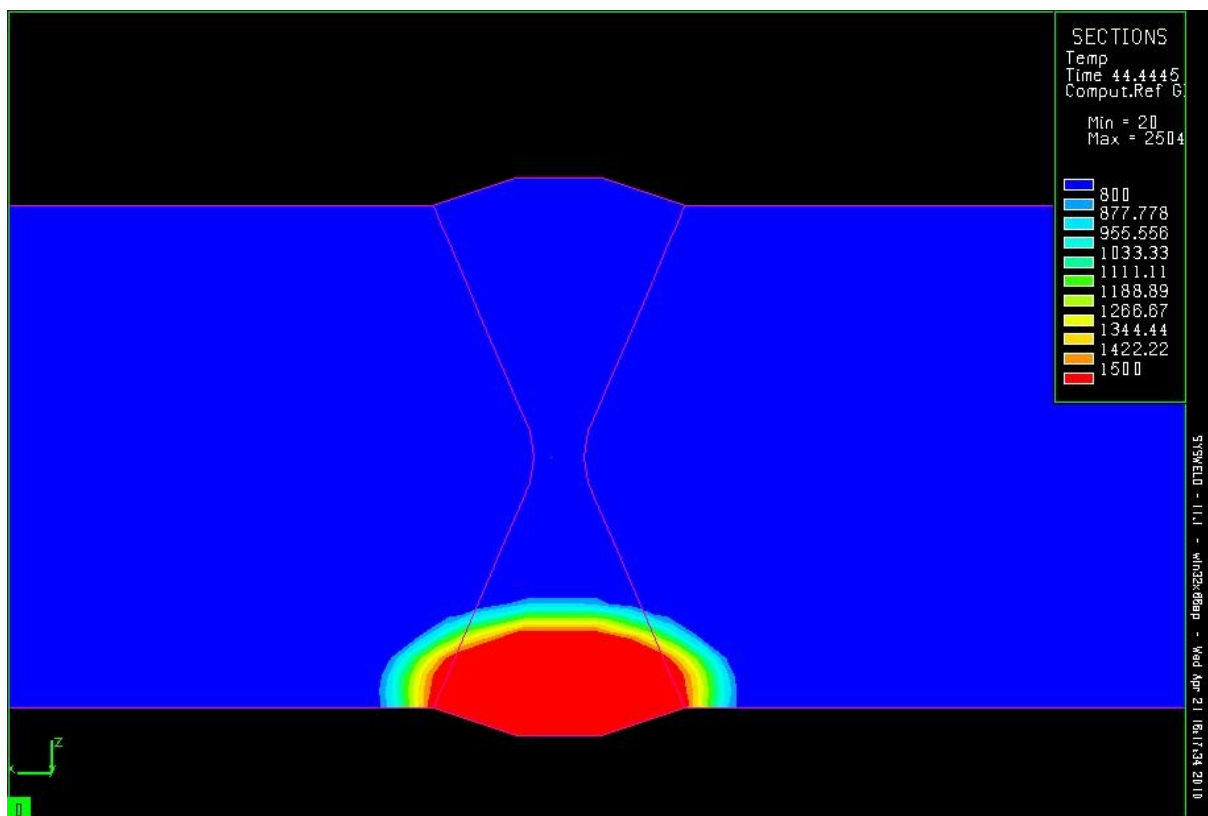


Obrázek č. 39 Numerický model pro vlastní simulaci procesu svařování

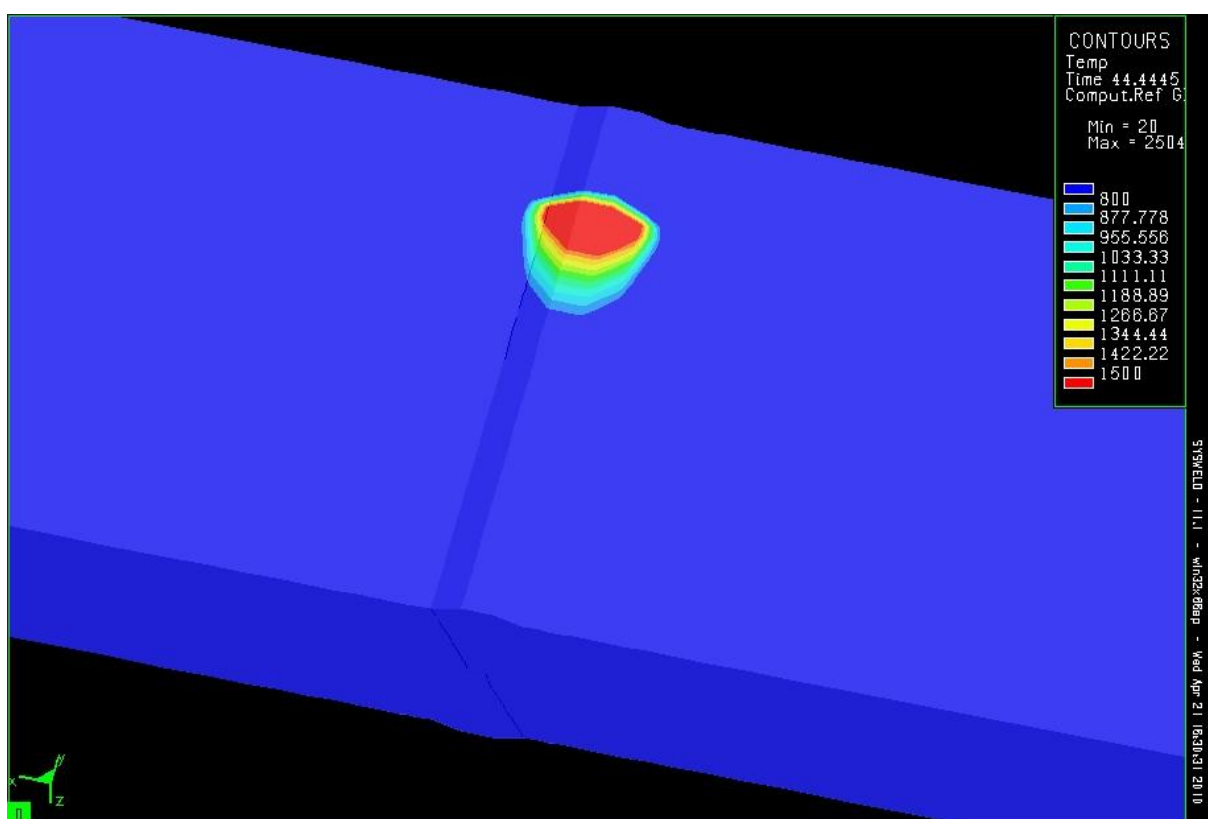


Obrázek č. 40 Detail do oblasti numericky modelovaného svarového spoje

Pro jednotlivé svary bylo v programu Sysweld nalaďeny tepelné zdroje, tak aby svou velikostí a zónou působení, pak ve výsledku odpovídaly výše uvedené makrostruktuře (obr. č. 38). Na ukázkou na obrázku č. 41 a č. 42 uvádím nalaďený tepelný zdroj pro poslední svar, čili svar 8. Ostatní nalaďené zdroje jsou součástí přílohy č. 1.



Obrázek č. 41 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 8 – pohled v řezu (jednotky ve °C)



Obrázek č. 42 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 8 – pohled shora (jednotky ve °C)

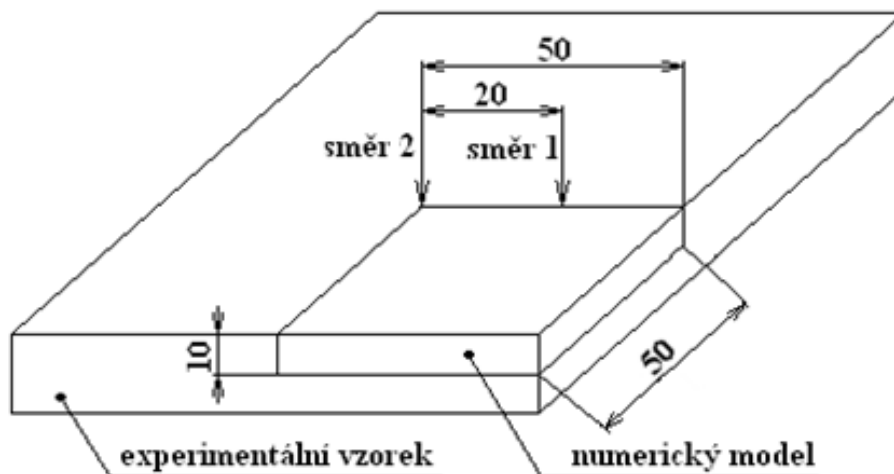
3. Výpočet teplotních polí a zbytkových napětí a porovnání s experimenty

3.1 Výstupy z numer. simulace tepelného zpracování a jejich porovnání s experimenty

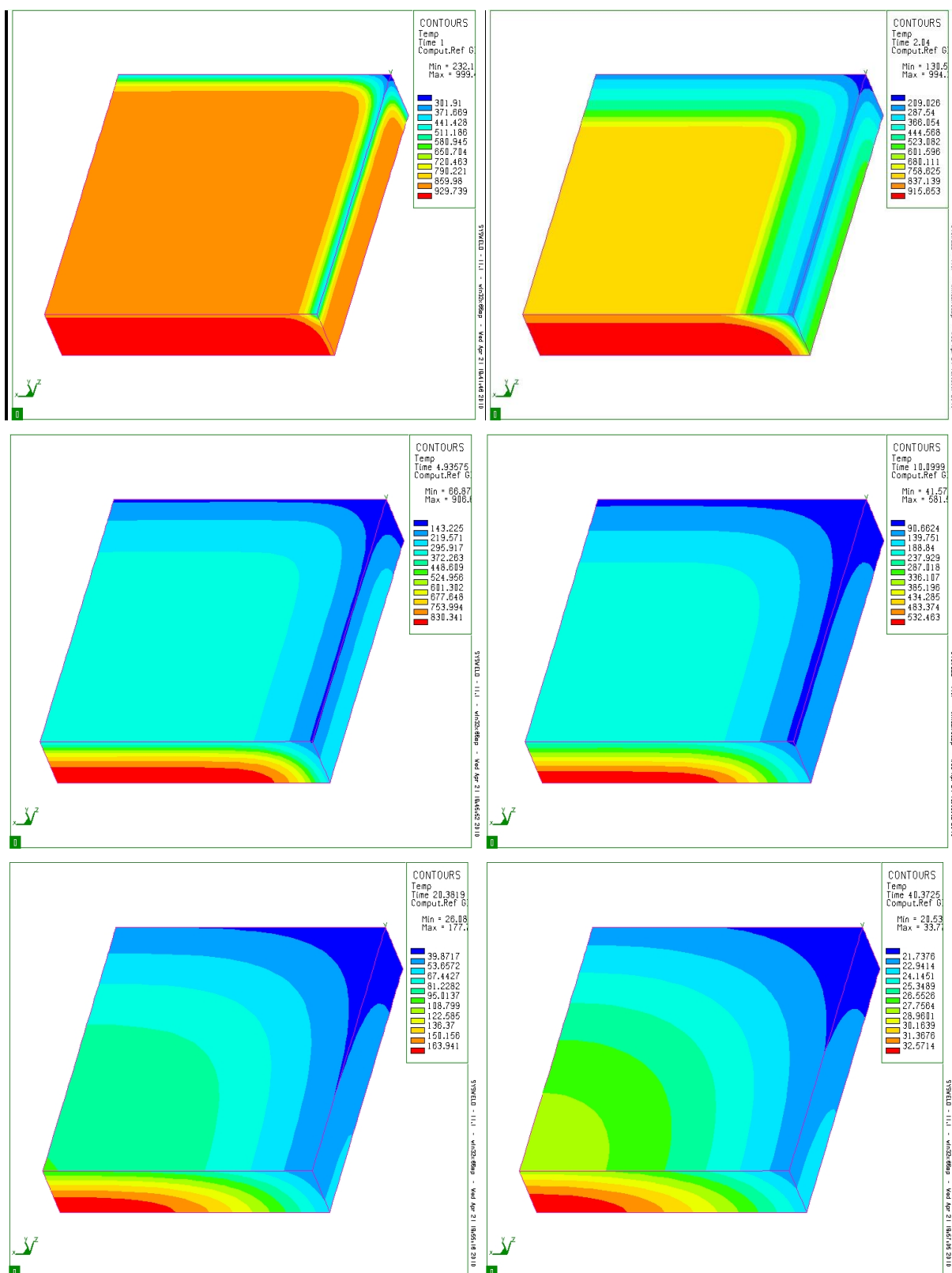
Jedním z výsledků, který nám nejvíce vypovídá o konečných vlastnostech součástí po tepelném zpracování, jsou výsledky tepelného pole, čili v podstatě jde o zachycení průběhu ochlazování na modelovaných deskách. Ochlazování probíhala v různých prostředích (viz bod 2.1). Jednoduše lze říct, že čím rychleji proběhne ochlazení z žhacích teplot, tím snáz se materiál zakalí, tzn., že výsledná struktura součásti bude obsahovat větší procentuální zastoupení martenzitu, popř. horního bainitu. Tím rovněž zbytková napětí a tvrdost budou dosahovat větších hodnot.

Jak jsem výše uváděl, díky symetrii desky (100 x 100 x 20) mm jsme si pro numerickou simulaci tepelného zpracování vystačili pouze s 1/8 desky a to hlavně z důvodu přesnějšího postihnutí výstupních výsledků, díky drobnější diskretizaci. Pro názornou ukázkou vykreslení teplotních polí, jsem vybral ochlazování vzorku ve vodě, čili podle tabulky č. 3 je označení vzorku pod číslem 3. Teplotní pole jsou u tohoto vzorku zachycena na obrázku č. 44. Na tomto obrázku si je možno povšimnout, že již po 40 s ochlazování dle numerické simulace byla deska téměř ochlazená, teplota vzorku byla přibližně 25 °C.

Pro následnou verifikaci výsledků podávaných reálným experimentem a numerickou simulací se bylo nutno zaměřit na vyhodnocování rozměrově stejných míst na vzorcích. Porovnávaly se průběhy tvrdostí, zbytkových napětí a výsledných struktur po úplném ochlazení a to ve směrech 1 a 2, které jsou rozměrově znázorněny na obrázku č. 43. Průběhy tvrdosti se posuzovaly ve směrech 1 a 2 přes celou tloušťku modelu. Určení zbytkových napětí probíhalo jen ve směru 2 a to také přes celou tloušťku modelu. Ve stejném směru rovněž probíhalo snímání průběhů procentuálního zastoupení jednotlivých struktur.



Obrázek č. 43 Grafické znázornění vzorku a směrů měření průběhů užitečných vlastností



Obrázek č. 44 Teplotní pole vzorku č. 3 (jednotky ve °C)

Verifikace výsledné struktury

Výsledná struktura u reálných vzorků po chlazení byla zjišťována pomocí optického mikroskopu při 100 násobném zvětšení. Rozbory struktury byly zjišťovány u každého vzorku jak pod povrchem, tak i ve středu vzorku. Výsledky z reálného měření na optickém mikroskopu jsou zachyceny v tabulce č. 5. Pro verifikaci poslouží výsledky z numerické simulace, které budou brány ve směru 2 u každého vzorku. Tento směr zahrne jak povrchovou vrstvu, tak i střed vzorku. Výsledky získané numerickou simulací jsou v procentuálním zastoupení jednotlivých struktur a jsou vyhodnoceny v tabulce č. 6.

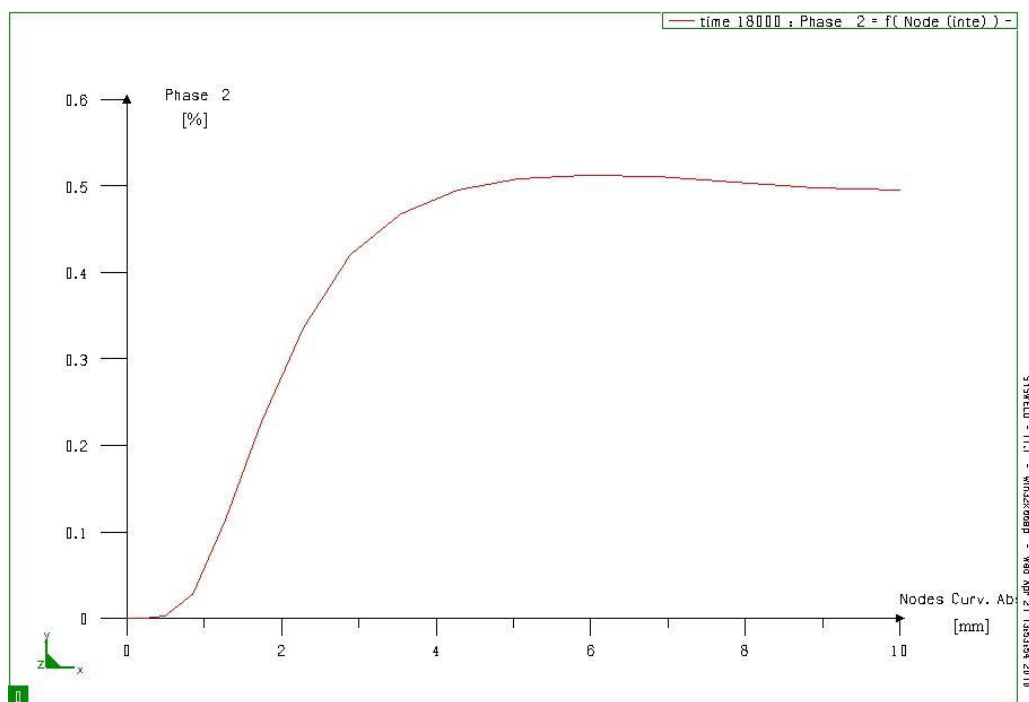
Tabulka č. 5 Vyhodnocení mikrostruktury na reálných vzorcích [18]

Vzorek č.	Metalografický rozbor	
	pod povrchem	ve středu vzorku
1	Feriticko-perlitická struktura, vlivem oduhličení povrchu ochuzena o uhlík, převažuje feritická fáze.	Feriticko-perlitická struktura, feritické jehlice, došlo ke zhrubnutí zrna.
2	Feriticko-perlitická struktura, s minimálním obsahem perlitu, výrazně hrubší feritické zrna	Feriticko-perlitická struktura, s vyšším obsahem perlitu, výrazné řádkování, zhrublé zrna
3	Feritická struktura s bainityckými karbidy, jemné zrna, nízký obsah perlitu, oduhličení pod povrchem	Bainitické desky vyrůstající z feritické matrice
4	Feriticko-perlitická struktura, náznak řádkování	Feriticko-perlitická struktura, jemná struktura díky tepelnému zpracování, popuštěný perlit
5	Feriticko-perlitická struktura, řádkování způsobená tvářením, vlivem rychlosti ochlazování je velikost feritických zrn nerovnoměrná, stopy po opracování povrchu	Feriticko-perlitická struktura, náznak řádkování, vlivem rychlosti ochlazování je velikost feritických zrn nerovnoměrná

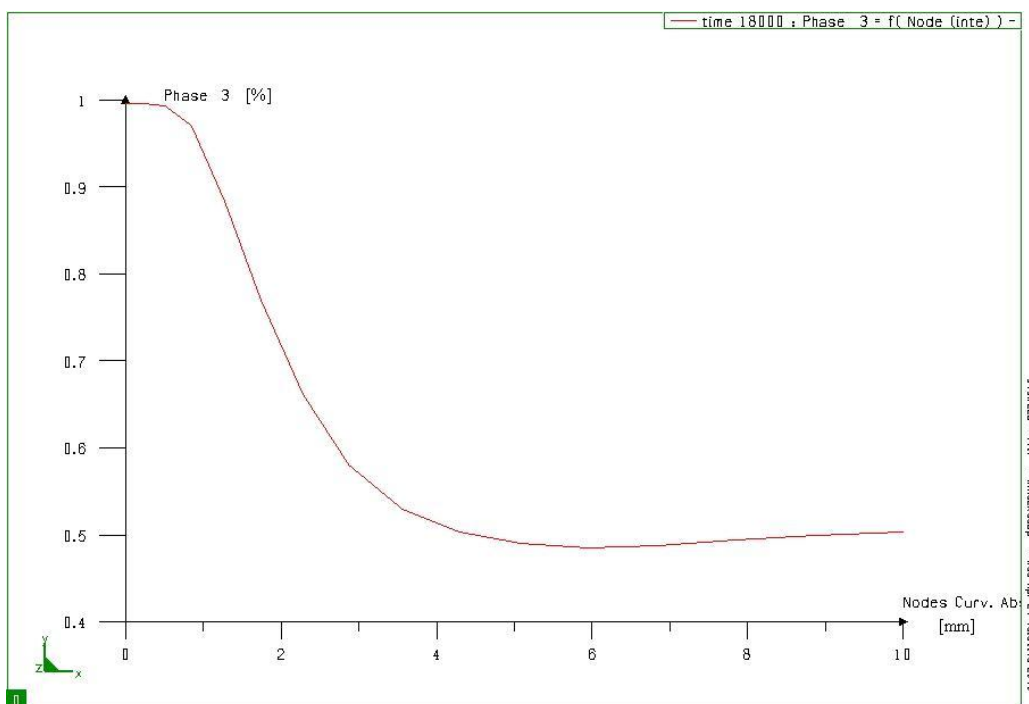
Tabulka č. 6 Složení výsledné struktury stanovené numerickou simulací

Vzorek č.	Numerická simulace	
	pod povrchem	ve středu vzorku
1	ferit + perlit = 99,93 % + zbytkový austenit a martenzit	ferit + perlit = 99,95 % + zbytkový austenit a martenz
2	100 % ferit + perlit	100 % ferit + perlit
3	100 % martenzit	49 % bainit + 51 % martenzit
4	100 % ferit + perlit	100 % ferit + perlit
5	100 % ferit + perlit	100 % ferit + perlit

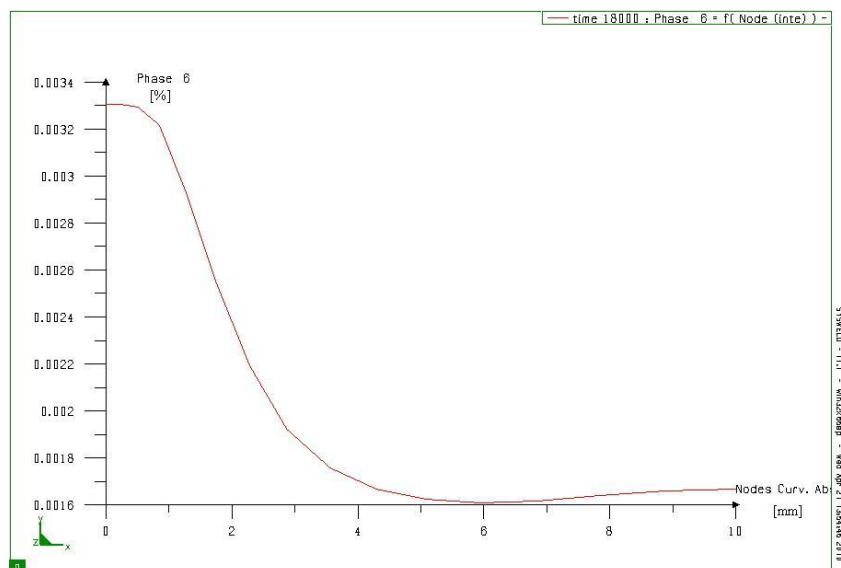
Detailnější zachycení výsledné struktury stanovené numerickou simulací uvádí grafické závislosti mezi procentuálním složením dané struktury a vzdálenosti od povrchu do středu vzorku. Tyto závislosti pro vzorek č. 3 jsou zachyceny na obrázcích č. 45 až 47. Na obrázcích č. 48 až 50 jsou konturově zachycena procentuální rozložení jednotlivých struktur u téhož vzorku.



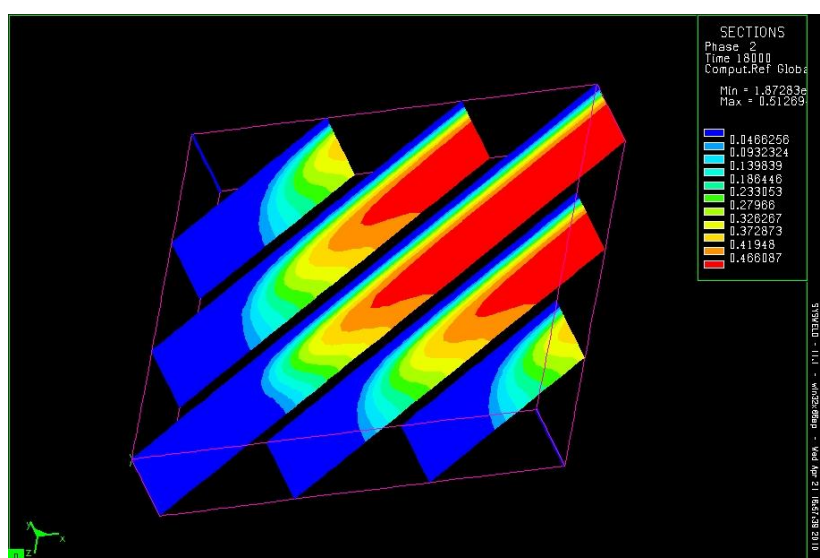
Obr. č. 45 Procentuální obsah bainitu ve struktuře v závislosti na hloubce- vzorek č.3



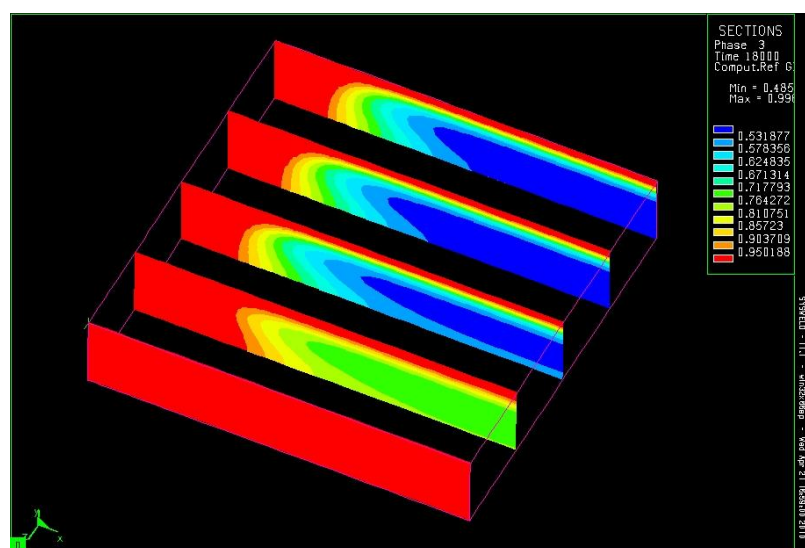
Obr. č. 46 Procentuální obsah martenzitu ve struktuře v závislosti na hloubce- vzorek č. 3



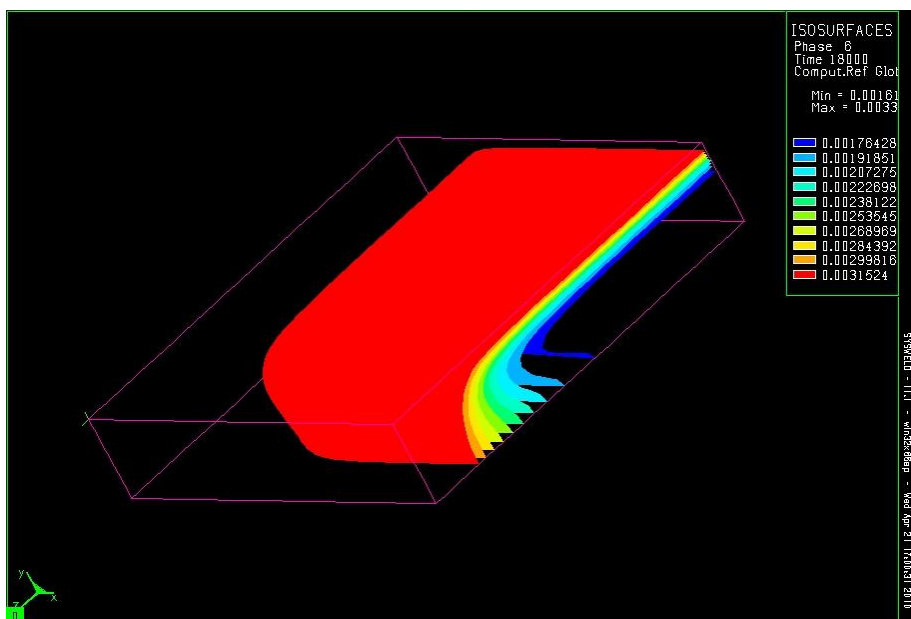
Obr. č. 47 Procentuální obsah zbytl. austenitu ve struktuře v závislosti na hloubce- vzorek č. 3



Obrázek č. 48 Konturové zobrazení rozložení bainitu v % ve výsledné struktuře u vzorku č. 3



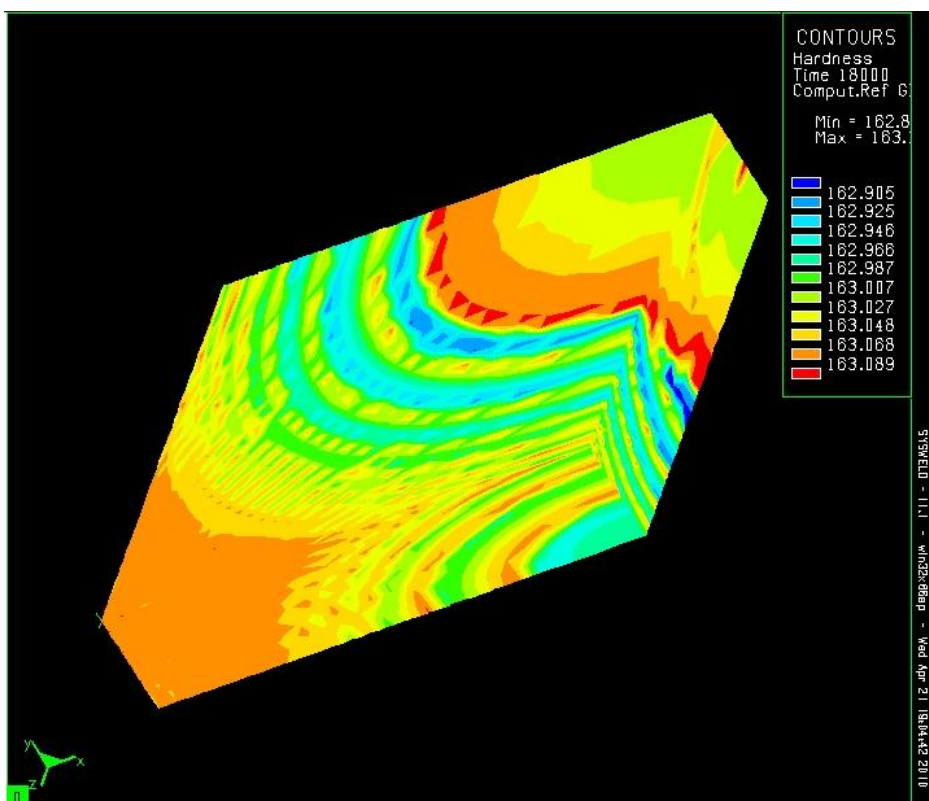
Obr. č. 49 Konturové zobrazení rozložení martenzitu v % ve výsledné struktuře u vzorku č. 3



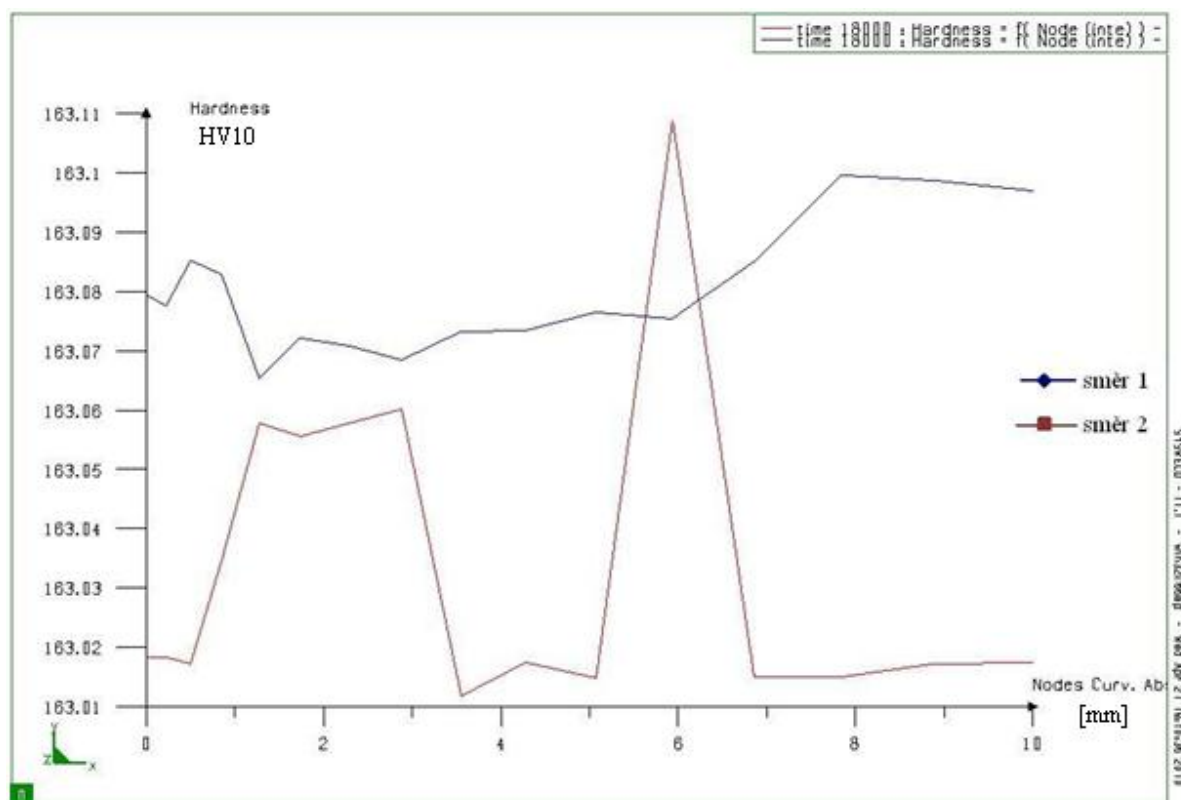
Obr.č.50 Konturové zobrazení rozložení zbytl. austenitu v %, v konečné struktuře u vzorku č.3

Verifikace průběhů tvrdosti

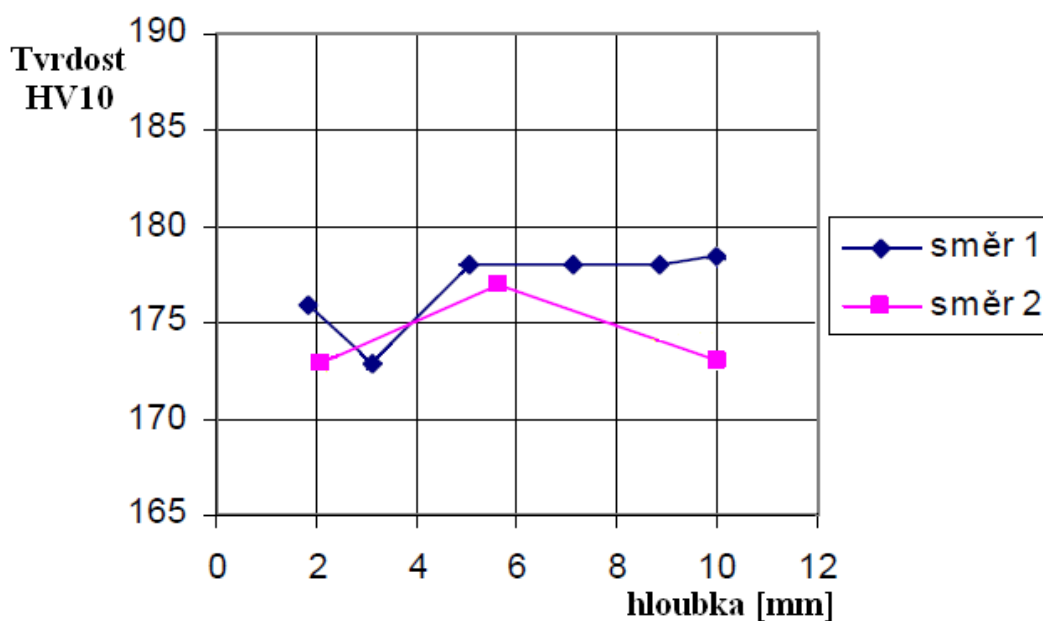
Predikovaná tvrdost po ochlazení zachycená konturově u vzorku č. 1 je zachycena na obrázku č. 51. Průběhy simulovaných tvrdosti pro vzorek č. 1 ve směrech 1 a 2 jsou zachyceny na obrázku č. 52. Průběhy tvrdostí stanoveny experimentálním měřením na skutečném vzorku č. 1 jsou zachyceny na obrázku č. 53.



Obrázek č. 51 Tvrdost HV10 po ochlazení- vzorek č. 1



Obrázek č. 52 Numerickou simulací predikovaný průběh tvrdosti ve směrech 1 a 2- vzorek č.1



Obrázek č. 53 Měřený průběh tvrdosti ve směrech 1 a 2 na reálném vzorku- vzorek č. 1 [18]

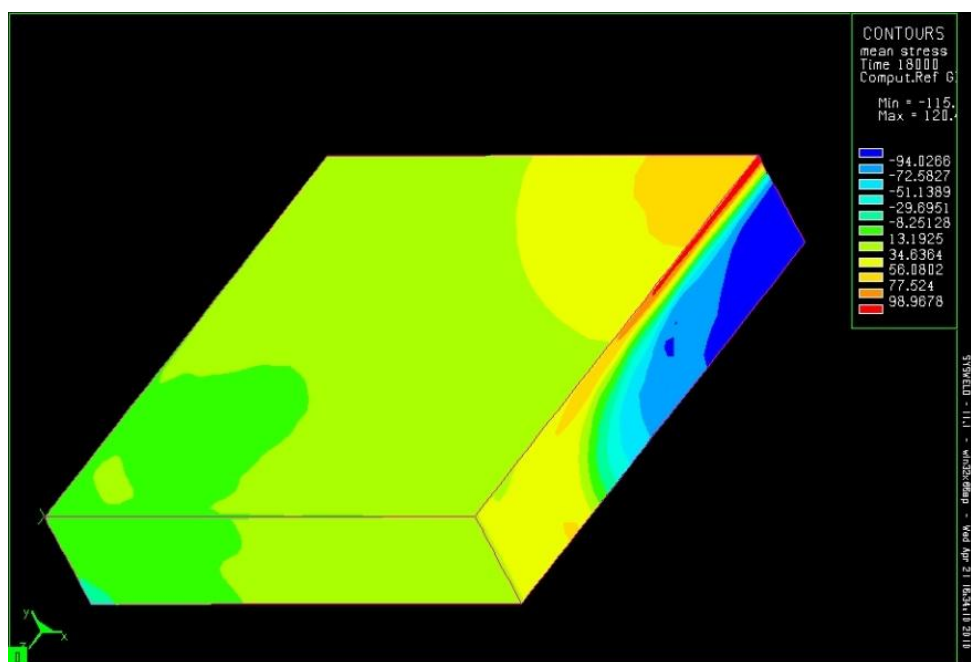
Ostatních průběhy tvrdosti stanovených numerickou simulací u ostatních vzorků jsou uvedeny v příloze č. 2, pro verifikaci hodnot tvrdostí získaných z numerické simulace a z reálného měření [18] poslouží tabulka č. 7, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty tvrdostí ve směrech 1 a 2.

Tabulka č. 7 Srovnání průměrných hodnot tvrdosti ve směrech 1 a 2

vzorek č.	průměrné hodnoty tvrdosti HV 10			
	výsledky z numerické simulace		výsledky z reálného měření	
	směr 1	směr 2	směr 1	směr 2
1	163,1	163,5	176,4	177,1
2	162,8		158	163,6
3	439	437,5	295,4	286,2
4	163		169,5	177
5	162,8		172,9	164,1

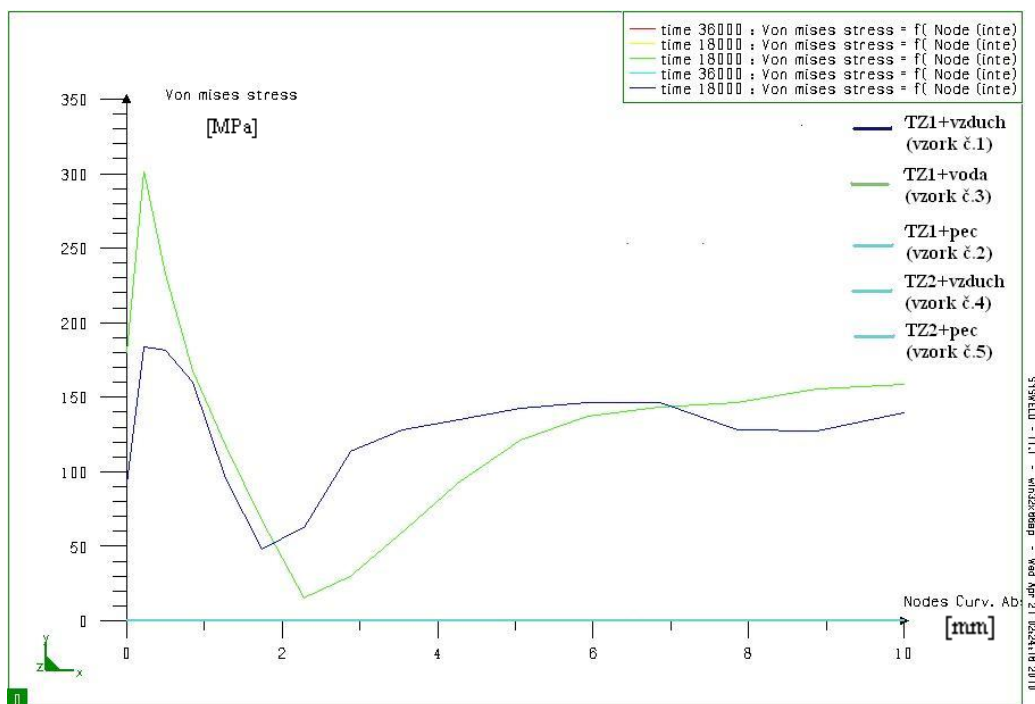
Verifikace zbytkových napětí

Jako porovnávací hodnota pro verifikaci zbytkových napětí byla použita hodnota redukovaného napětí dle hypotézy HMM. Zbytková napětí byla určována na všech vzorcích a to ve směru 2. Na obrázku č. 54 uvádím konturové rozložení středních zbytkových napětí po úplném ochlazení na vzorku č. 1.



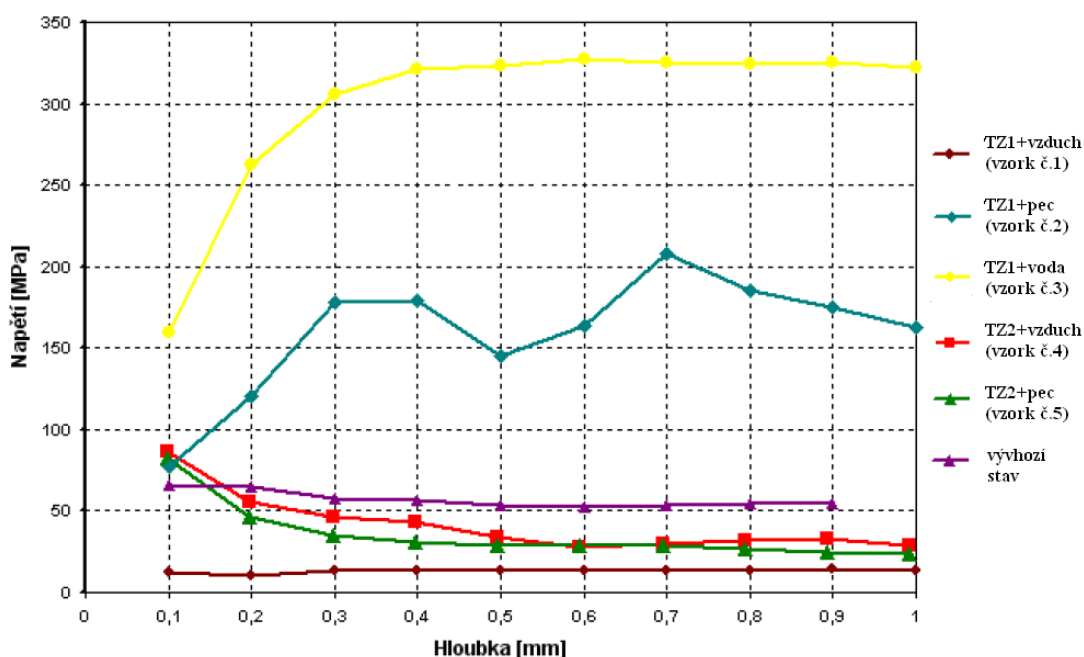
Obrázek č. 54 Konturové rozložení středních zbytkových napětí v MPa vzorku č. 1

Na dalším obrázku č. 55 jsou zachyceny grafické závislosti změny redukovaných zbytkových napětí dle hypotézy HMM, v závislosti na hloubce od povrchu vzorku, tyto průběhy byla stanoveny numerickou simulací ve směru 2.

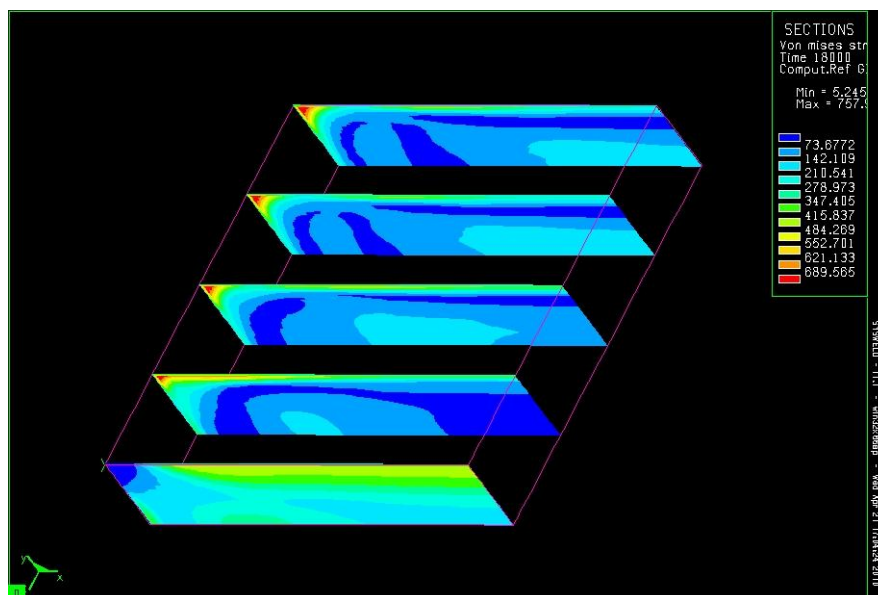


Obr. č. 55 Průběhy zbytkových napětí dle HMH ve směru 2 stanovené numer. simulací

Pro verifikaci poslouží vypočtené hodnoty redukovaných napětí dle hypotézy HMH (viz obr. 56), které se spočetly z naměřených hodnot napětí v jednotlivých směrech x a y, které se odměřily odvrtávací metodou. Verifikace zbytkových napětí je možná pouze do hloubky 1 mm pod povrchem vzorku, hodnoty zbytkových napětí dle HMH do větších hloubek již práce [18] neuvádí. Postup měření zbytkových napětí odvrtávací metodou je detailně popsán v práci [18]. Na obrázku č. 57 je konturově zachyceno rozložení zbytkových napětí dle HMH u vzorku č. 3, tedy u vzorku, který byl chlazen ve vodě.



Obr. č. 56 Redukovaná zbytková napětí dle HMH stanovená exp. měřením ve směru 2 [18]

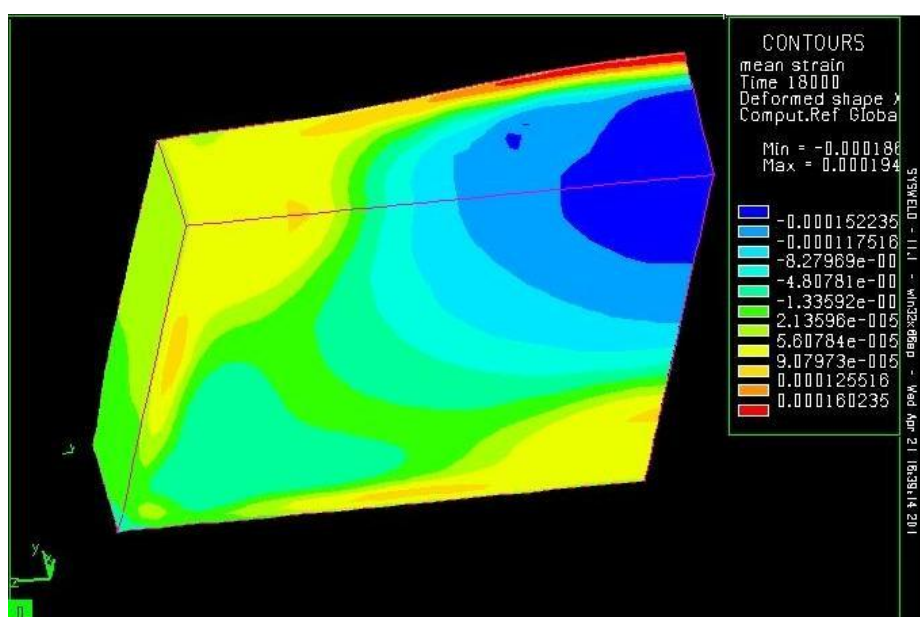


Obrázek č. 57 Konturové rozložení zbytkových napětí v MPa dle hypotézy HMH u vzorku č.3

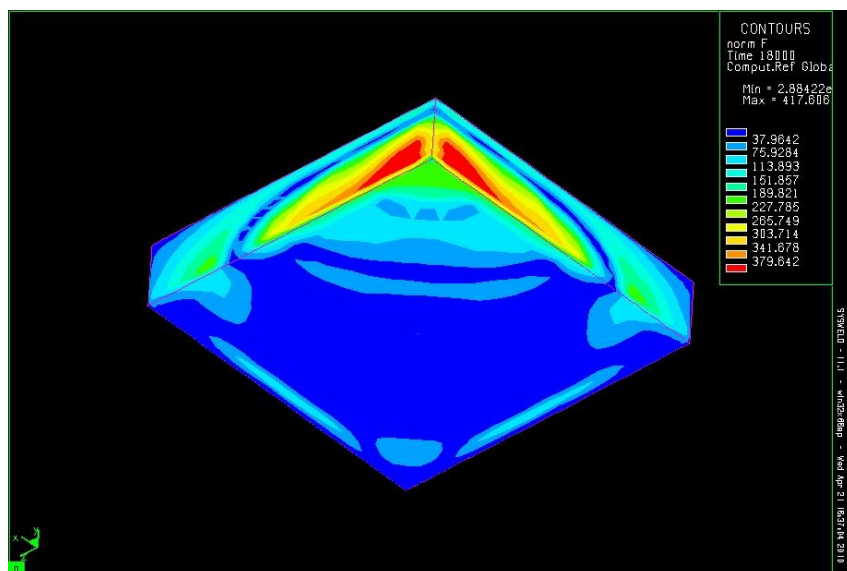
Další výsledky podávány numerickou simulací

Numerická simulace nabízí celou řadu dalších výstupních výsledků, vzhledem k rozsahu práce jsou zde uvedeny jen následující vybrané výstupy a to jen pro vzorek č. 1 v konturovém zobrazení:

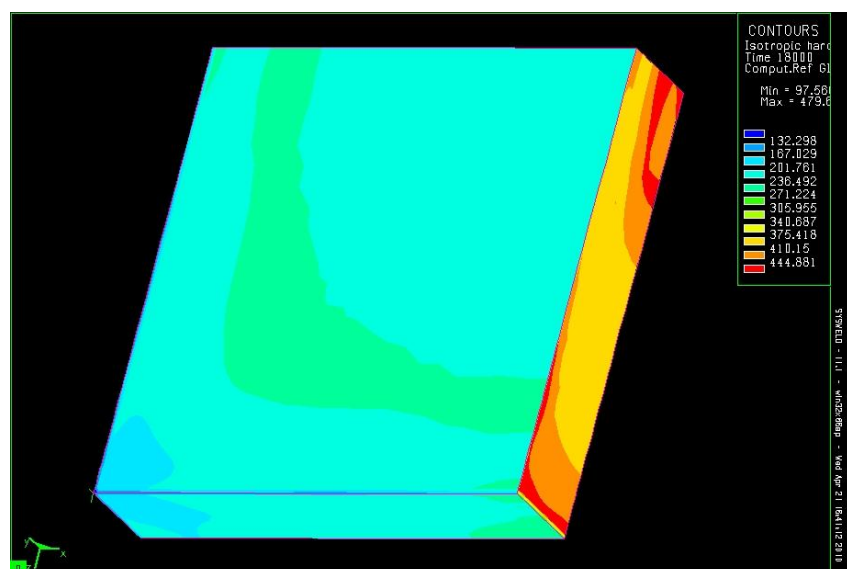
- Střední deformace vzorku po úplném ochlazení- obrázek č. 58, kde je pro názornost vzorek konturově zachycen při 50- ti násobném zvětšení deformace;
- Vnitřní reakce vzorku- obrázek č. 59;
- Zpevnění vzorku vyvolané tepelným zpracováním- obrázek č. 60;
- Termická deformace- obrázek č. 61.



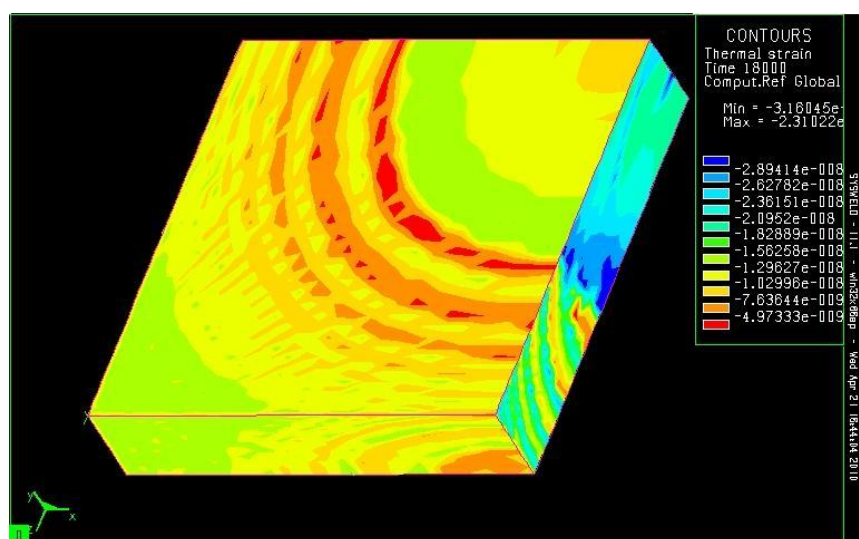
Obrázek č. 58 Střední deformace v % vzorku č.3 po úplném ochlazení (50x násobné zvětšení)



Obrázek č. 59 Vnitřní reakce v N vzorku po tepelném zpracování č. 3



Obrázek č. 60 Zpevnění vzorku v MPa č. 3 vyvolané tepelným zpracováním



Obrázek č. 61 Termická deformace v % vzorku č. 3 vyvolaná tepelným zpracováním

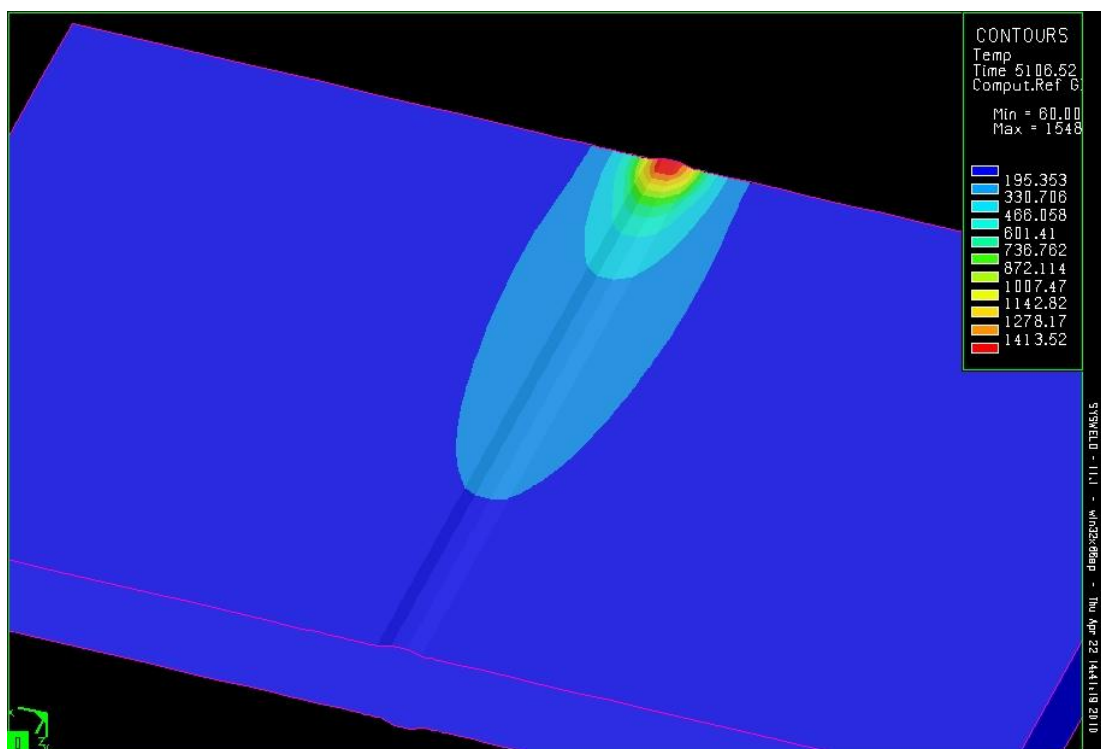
3.2 Výstupy z numerické simulace svařování a jejich porovnání s experimenty

Ve výpočtu nebyl zahrnut vliv popouštění svarových housenek, čili přezhíhání dřívě položené housenky housenkou, která byla zavařena později. A to z důvodů, že stávající verze programu, ve které byl experiment vypracováván, toto neumožňoval. Pozdější verze programu prý už obsahují výpočtový modul, který tento jev při více housenkovém svařování umožní zachytit.

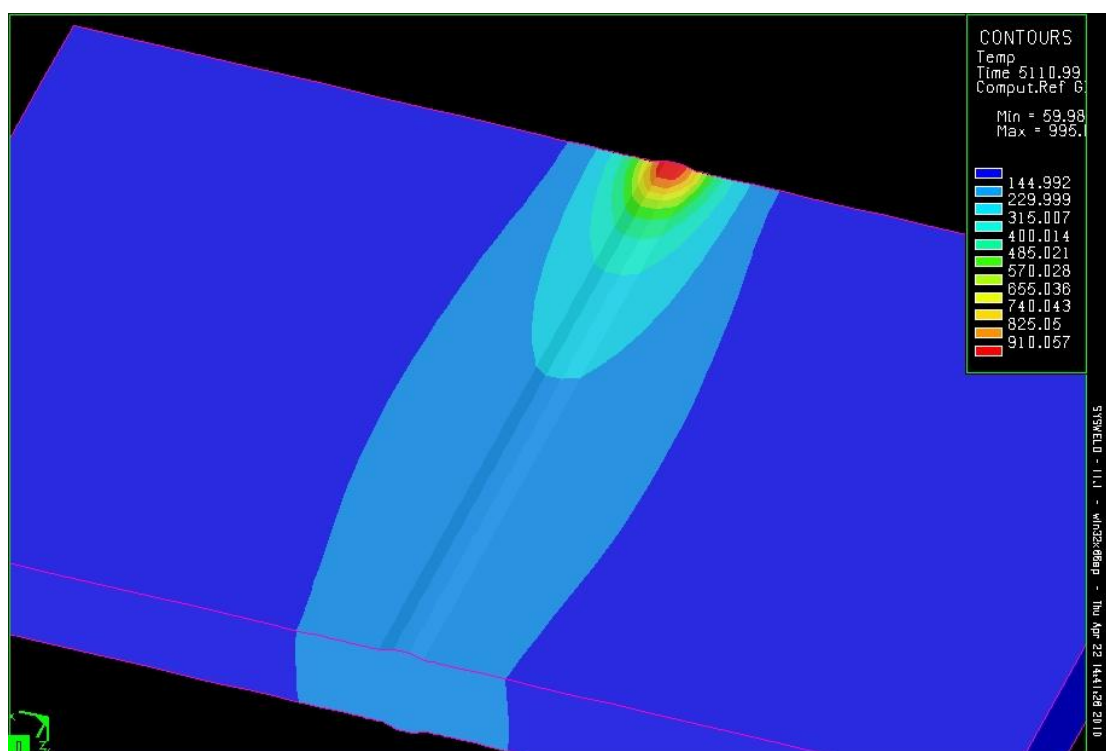
Diplomová práce rovněž neuvádí z technických a rozsahových důvodů výsledky z mechanické části výpočtu, čili v práci nejsou publikovány průběhy příčných a podélných zbytkových napětí ve svarovém spoji po svařování.

Jako u tepelného zpracování, tak i u svařování jsou důležité výsledky teplotního pole, čili vývin teplot v závislosti na čase svařování. Vývin konturového rozložení teplot po úplném zavaření tupého X- svarového spoje je zachycen na obrázku č. 62 až 66.

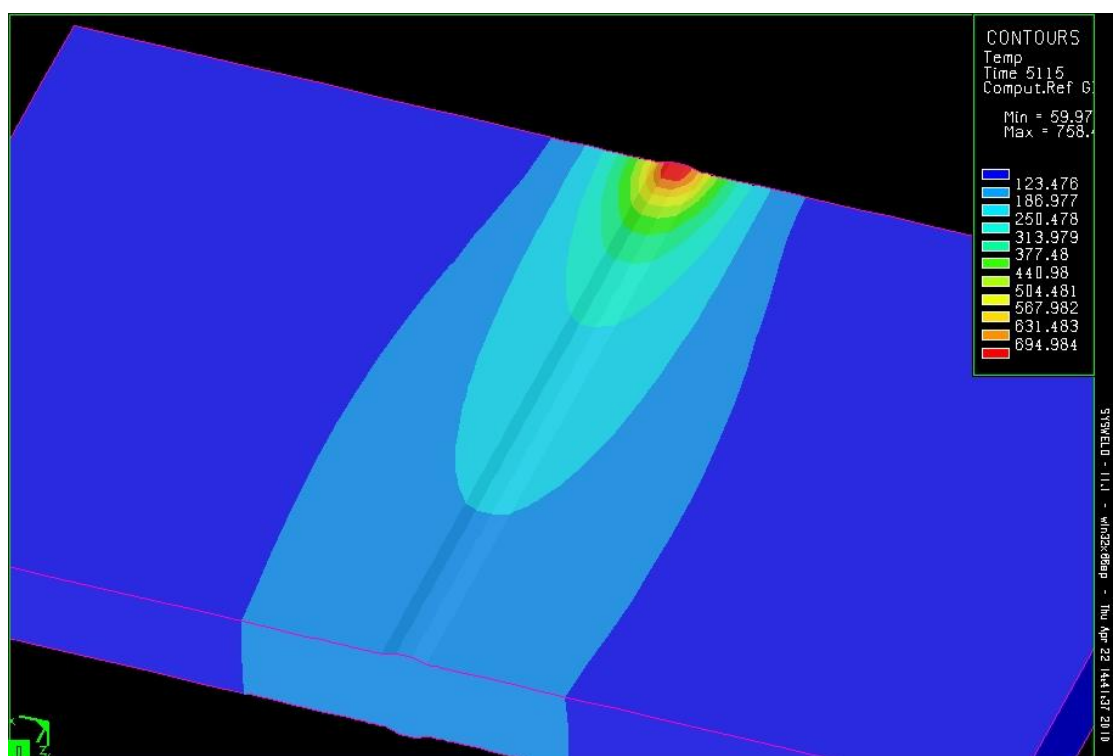
Z obrázků tepelného vývoje si je možno povšimnout, že numerická simulace po úplném zavaření všech housenek predikovala teplotu svarového spoje po 38 sekundách menší než 270 °C. Na obrázku č. 67 kde je zachycena zóna ovlivnění základního materiálu zdrojem tepla housenky č. 8, si je možno povšimnout toho, že velikost tepelného ovlivnění základního materiálu do teploty 150°C dosahuje šířka zhruba 84 mm. Tím lze říct, že na odvodu tepla z místa svaru se nepodílí základní materiál celou svou šířkou.



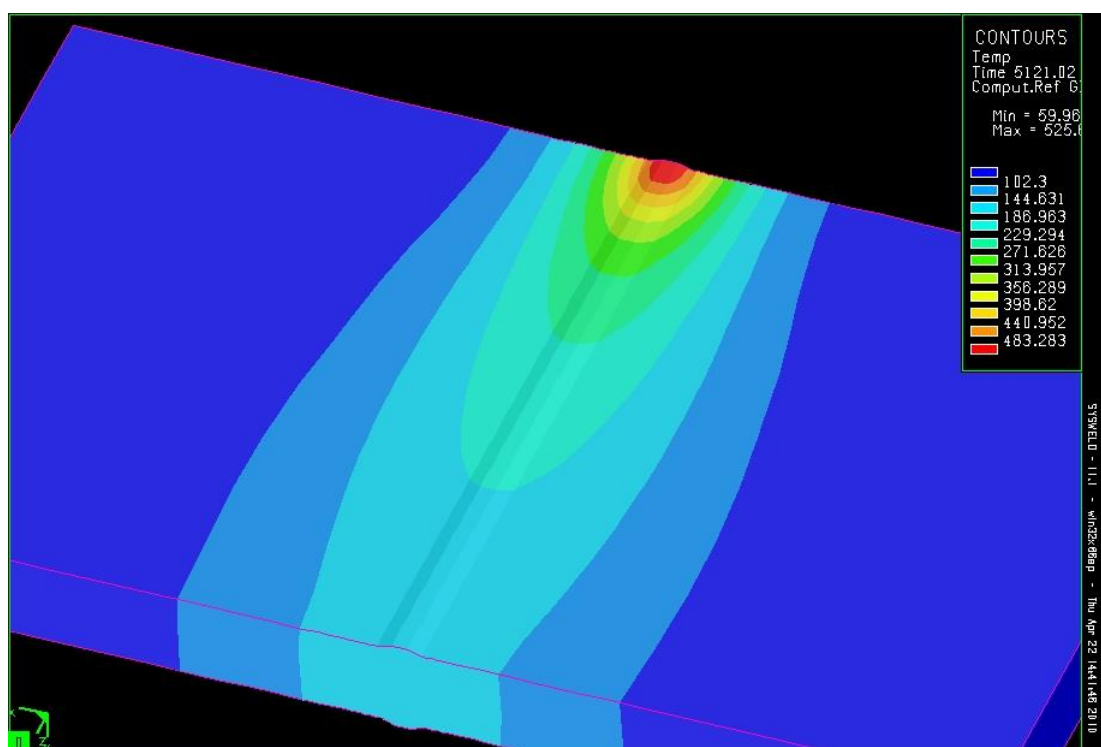
Obr. č. 62 Ochlazování svarového spoje -0,5 s po ukončení svařování (jednotky ve °C)



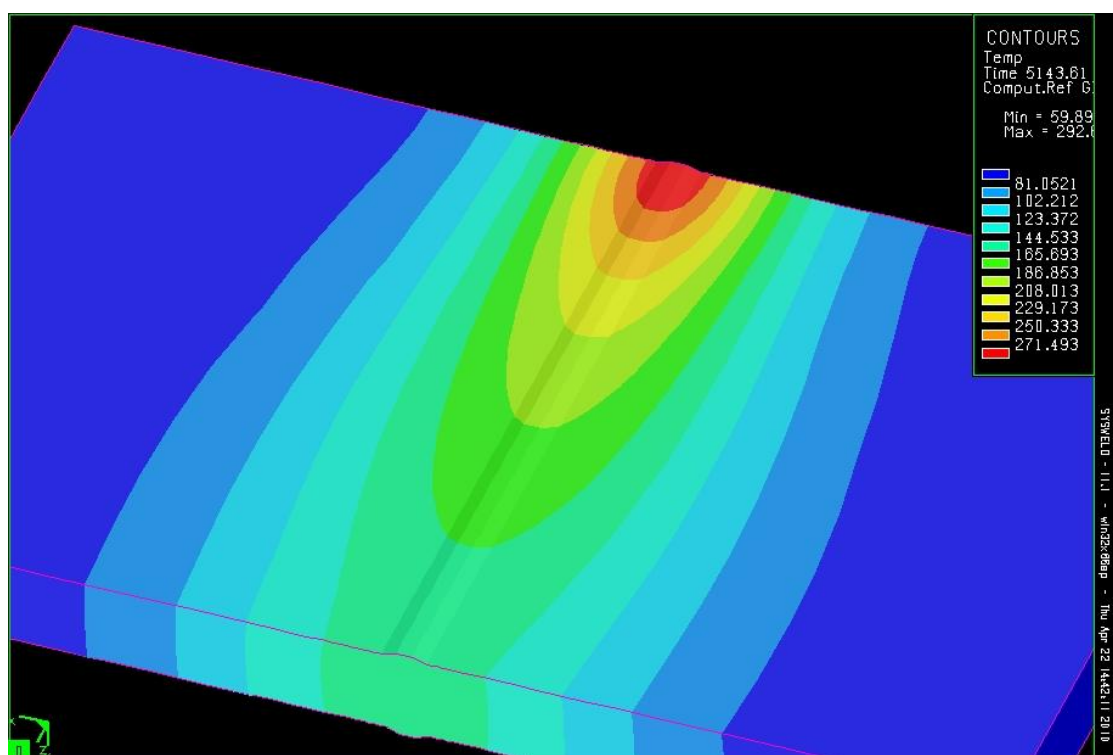
Obr. č. 63 Ochlazování svarového spoje- 5 s po ukončení svařování(jednotky ve °C)



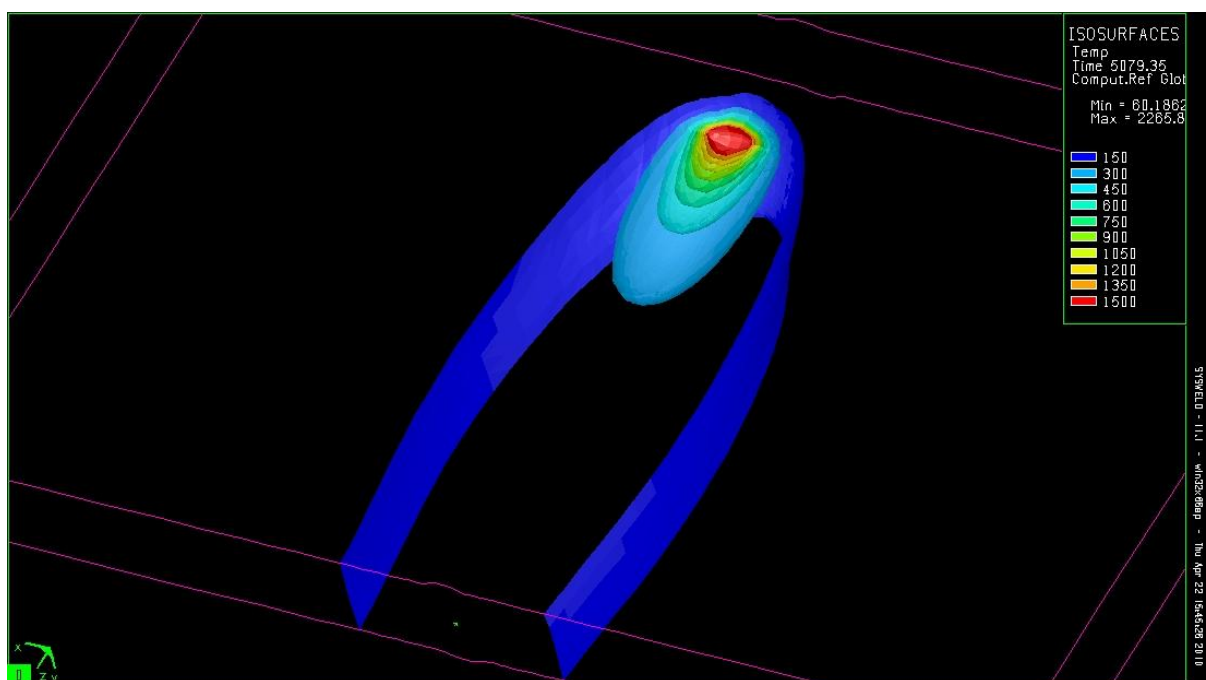
Obr. č. 64 Ochlazování svarového spoje- 9 s po ukončení svařování (jednotky ve °C)



Obr. č. 65 Ochlazování svarového spoje- 15 s po ukončení svařování (jednotky ve °C)



Obr. č. 66 Ochlazování svarového spoje- 37,6 s po ukončení svařování (jednotky ve °C)



Obrázek č. 67 Tepelné ovlivnění zdrojem tepla housenky č. 8 (jednotky ve °C)

Pro ocel S355J2G3 lze možno pomocí empirických vztahů stanovit teploty které budou určující pro určení velikostí jednotlivých pásem teplem ovlivněné oblasti, jde o:

- Teplotu tavení- výpočet dle Hrivňáka: [20]

$$T_{\text{tav}} = 1537 - (88C + 8Si + 5Cu + 1,5Cr + 4Ni + 2V + 30P + 25S) \quad (7)$$

$$T_{\text{tav}} = 1537 - (88 \cdot 0,2 + 8 \cdot 0,55 + 30 \cdot 0,035 + 25 \cdot 0,035)$$

$$T_{\text{tav}} = 1503 \text{ °C}$$

- Teplotu přehřátí, nad kterou dojde k hrubnutí zrna- Ocel svým chemickým složením lze zařadit do nelegovaných ocelí. Pro nelegované oceli je podle [19] teplota přehřátí 1050 °C, to znamená, že při teplotě 1050 °C dojde k rozpuštění precipitátů, které svým uložením na hranicích zrn brání migraci hranic zrn a tudíž i zvětšení zrna.

- Teplotu A_{c3} - Výpočet dle Yurioka: [21]

$$A_{c3} = 937,2 - 436,5C + 56Si - 19,7Mn - 16,3Cu - 26,6Ni - 4,9Cr + 38,1Mo + 124,8V + 136,3Ti \quad (8)$$

$$A_{c3} = 937,2 - 436,5 \cdot 0,2 + 56 \cdot 0,55 - 19,7 \cdot 1,6$$

$$A_{c3} = 850 \text{ °C}$$

- Teplotu A_{c1} - Výpočet dle Granga: [21]

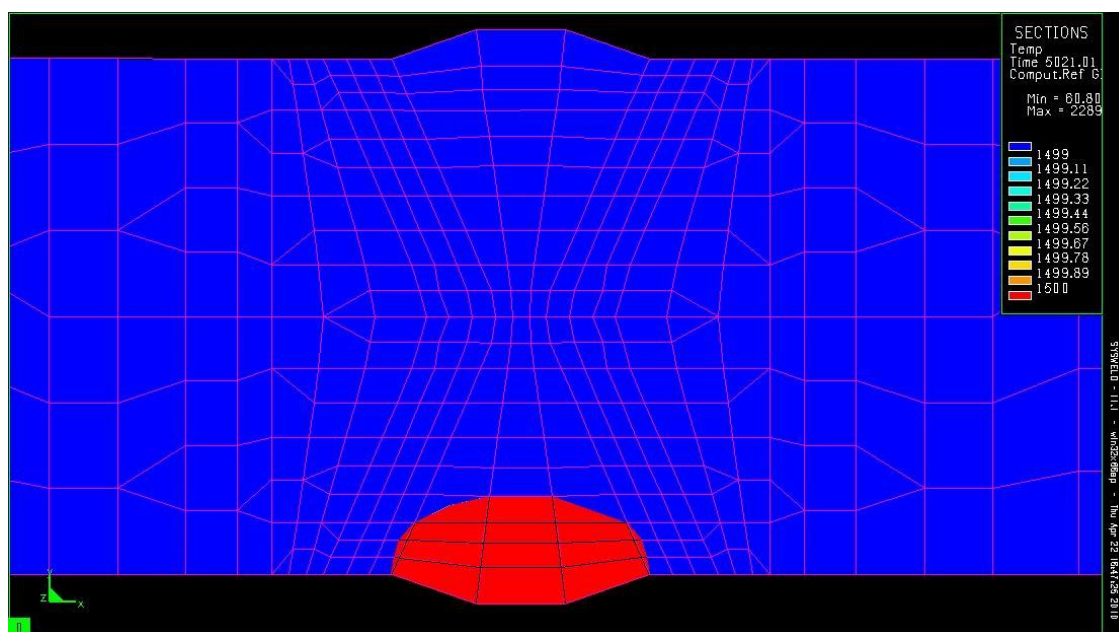
$$A_{c1} = 723 - 10,7Mn - 16,9Ni + 29,1Si + 16,9Cr + 6,38W \quad (9)$$

$$A_{c1} = 723 - 10,7 \cdot 1,6 + 29,1 \cdot 0,55$$

$$A_{c1} = 722 \text{ °C}$$

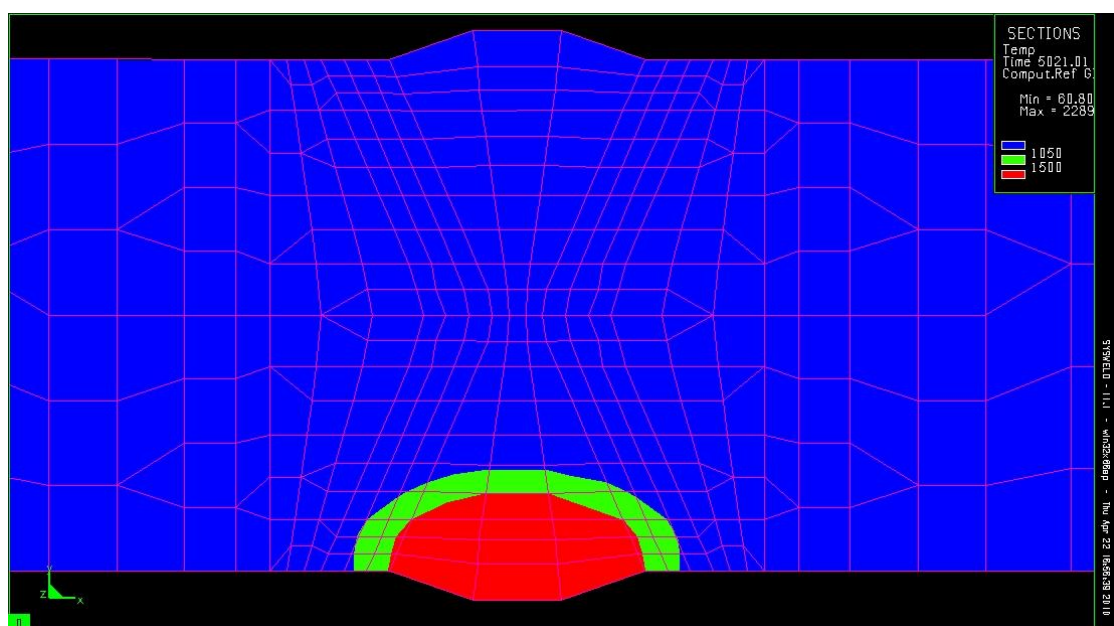
Pak v Sysweldu si lze vykreslit velikosti jednotlivých pásem teplem ovlivněné oblasti. Toto je vzhledem k rozsahu práce provedeno pouze pro svar č. 8 a jde o oblasti:

- **Svarový kov-** $T > T_{\text{tavení}}$ - Tato oblast se nezahrnuje do pásem teplem ovlivněné oblasti, ale pro úplnost a názornost je zde tato oblast uvedena. Velikost a rozložení natavené oblasti je na obrázku č. 68. Na obrázku si je možno povšimnout, že velikost a množství dodávaného tepla do svaru č. 8 je dostatečné, protože dojde k natavení předpokládaného objemu modelované housenky, tak jak je to modelově zachycena na obrázku č. 40.



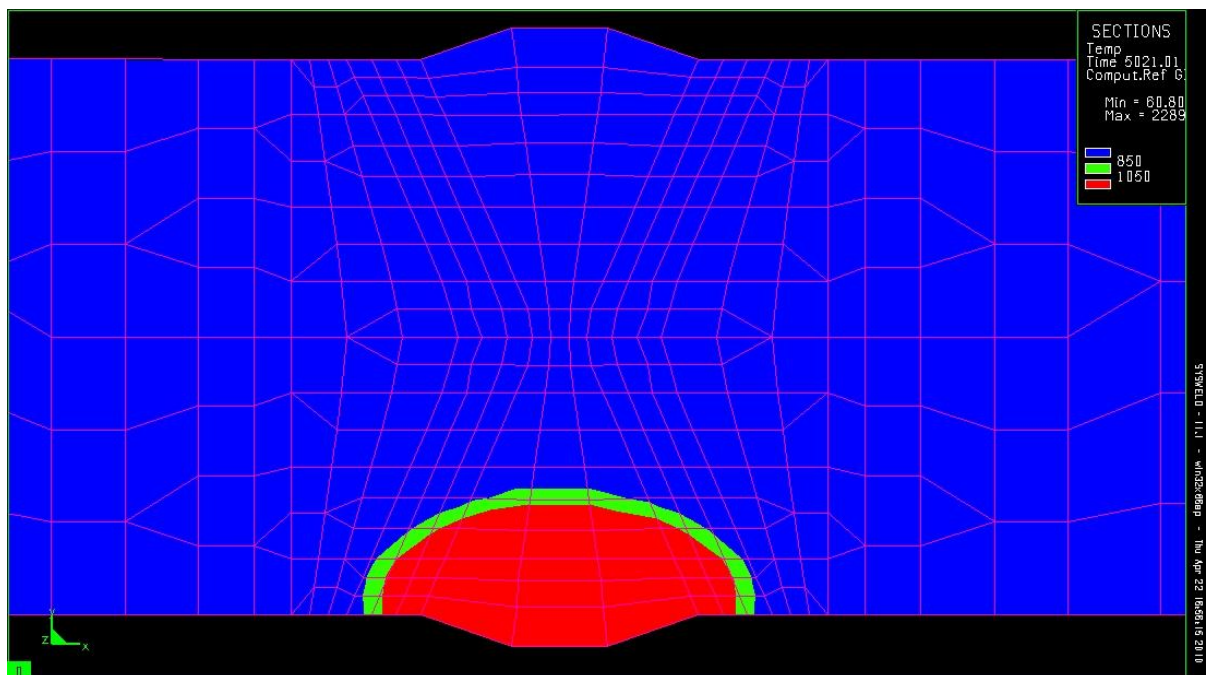
Obrázek č. 68 svarový kov 8 housenky

- **Pásmo přehřátí-** $T_{\text{přehřátí}} < T < T_{\text{solidu}}$. Viz obrázek č. 69



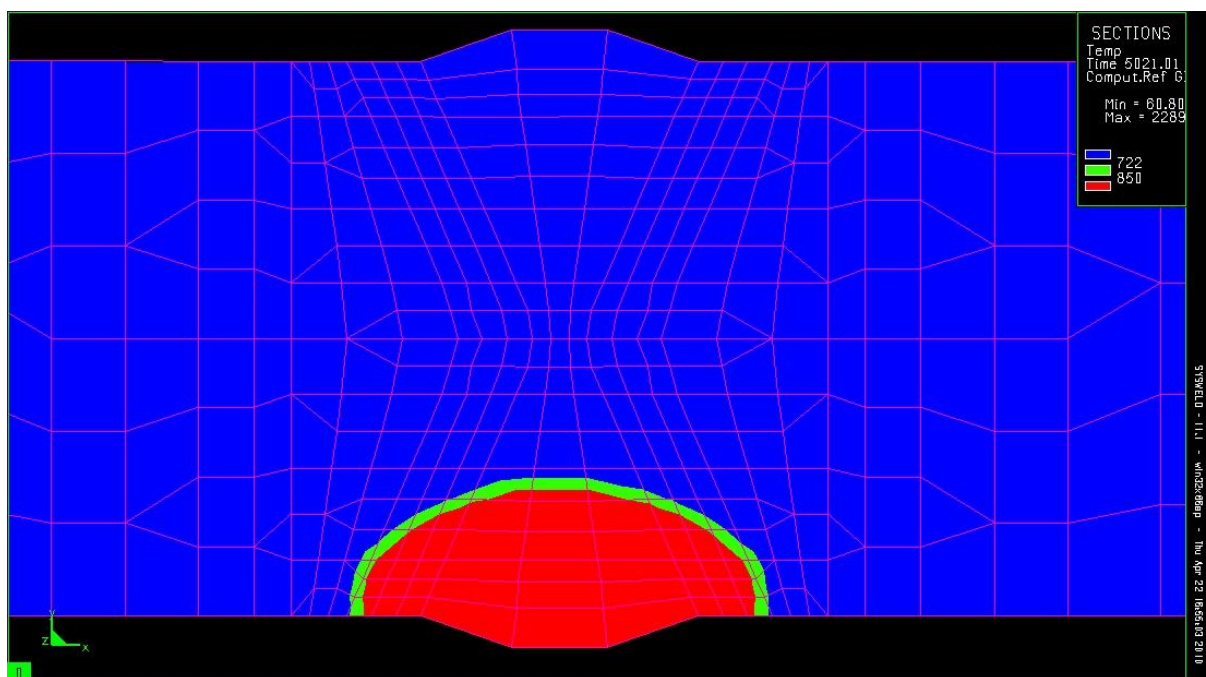
Obrázek č. 69 Pásmo přehřátí (zelená oblast) housenky č. 8

- **Pásmo normalizace-** $A_{c3} < T < T_{\text{přehřátí}}$. Jemnozrnná oblast, která svou strukturou odpovídá stavu oceli po normalizačním žíhání: Velikost pásma, viz obrázek č. 70.



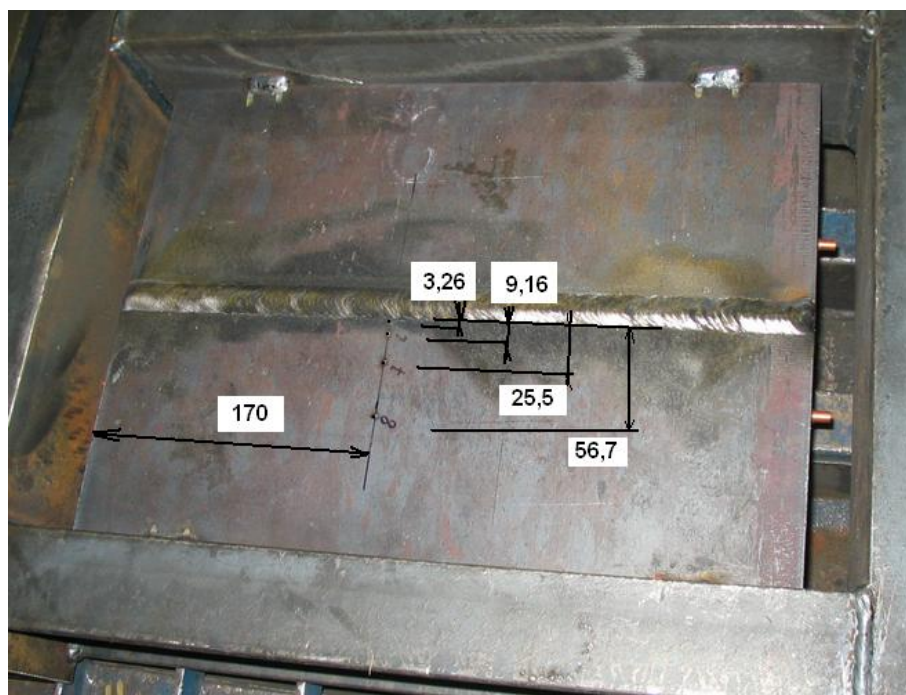
Obrázek č. 70 Pásmo normalizace (zelená oblast) housenky č. 8

- **Pásmo částečné překrystalizace-** $A_{c1} < T < A_{c3}$. Pásmo při ochlazování odpovídá překrystalizaci austenitu na ferit. V této oblasti se tudíž nachází dvojí struktura a to ta která tuto rekystalizaci stihla prodělat a ta, která tuto překrystalizaci ještě neprodělala. Velikost této oblasti u housenky č. 8 je zachycena na obrázku č. 71.



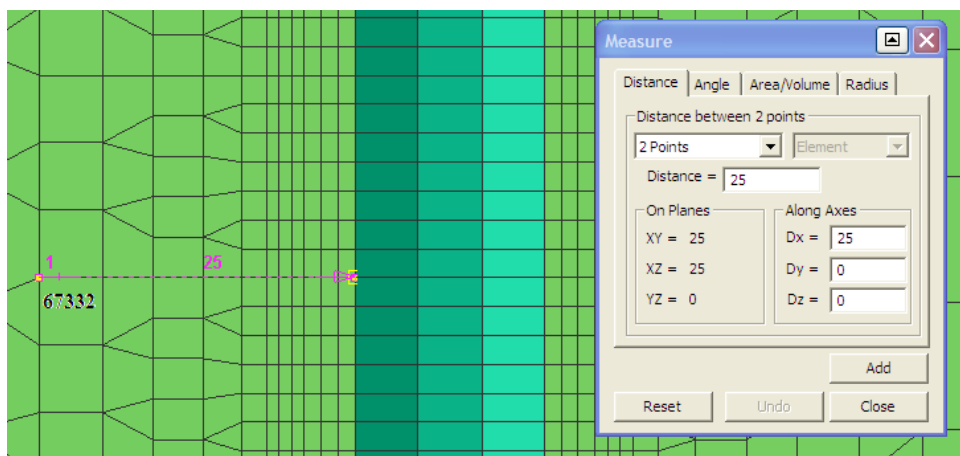
Obrázek č. 71 Pásmo částečné překrystalizace (zelená oblast) housenky č. 8

Další výsledky, které se již dají verifikovat s reálným měřením, jsou teplotní cykly svařování. V průběhu svařování bylo na 8 místech (bodech) snímána teplota v závislosti na čase. Z každé strany to byly tudíž 4 místa snímání, kde se snímala teplota. Na obrázku č. 72 je lokalizace termočlánků na horní části svarového spoje, čili na straně, kde vrchní část svaru tvoří housenka č. 6.



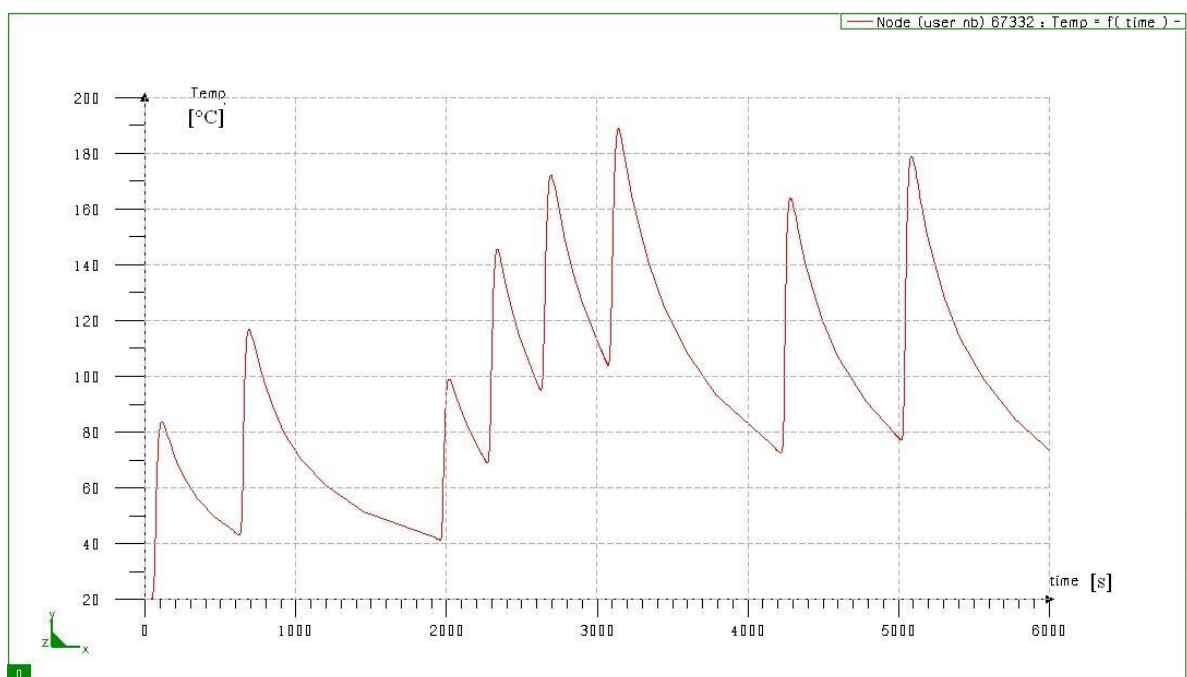
Obrázek č. 72 Lokalizace termočlánků [17]

Z hlediska rozsahu práce se verifikace teplotních cyklů bude vztahovat pouze na termočlánek č. 7, který je od okraje svarové housenky č. 6 vzdálen 25,5 mm jak je možno vidět na horním obrázku. Teplotní cyklus v Sysweldu lze vykreslit pouze mřížkové body. Na numerickém modelu musíme najít tudíž takový uzel, který se bude nacházet v blízkosti zadané vzdálenosti (25,5 mm), viz obrázek č. 73 bod (67332).



Obrázek č. 73 Lokalizace termočlánu na numerickém modelu (jednotky v mm)

K takto nalezenému uzlu si je možno v Sysweldu nechat vykreslit predikovaný teplotní cyklus, který je zachycen na obrázku č. 74. A teplotní cyklus získaný snímáním teplot pomocí termočlánu č. 7 je na obrázku č. 75.



Obrázek č. 74 Predikovaný teplotní cyklus bodu 67332

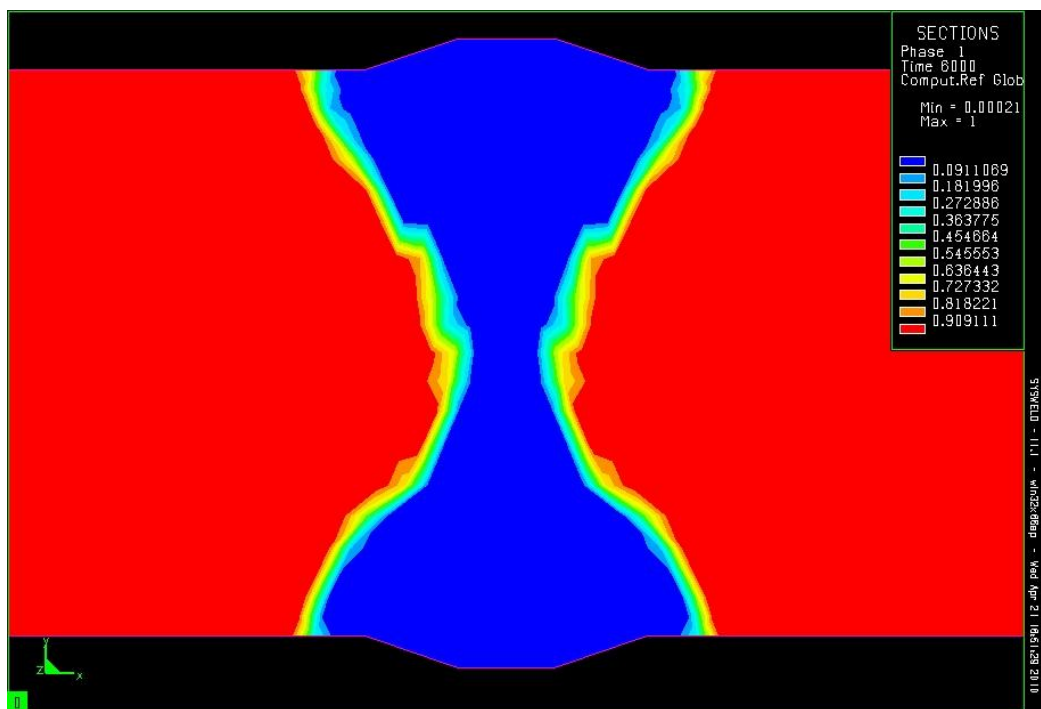


Obrázek č. 75 Záznam teploty na termočlánu č. 7 [17]

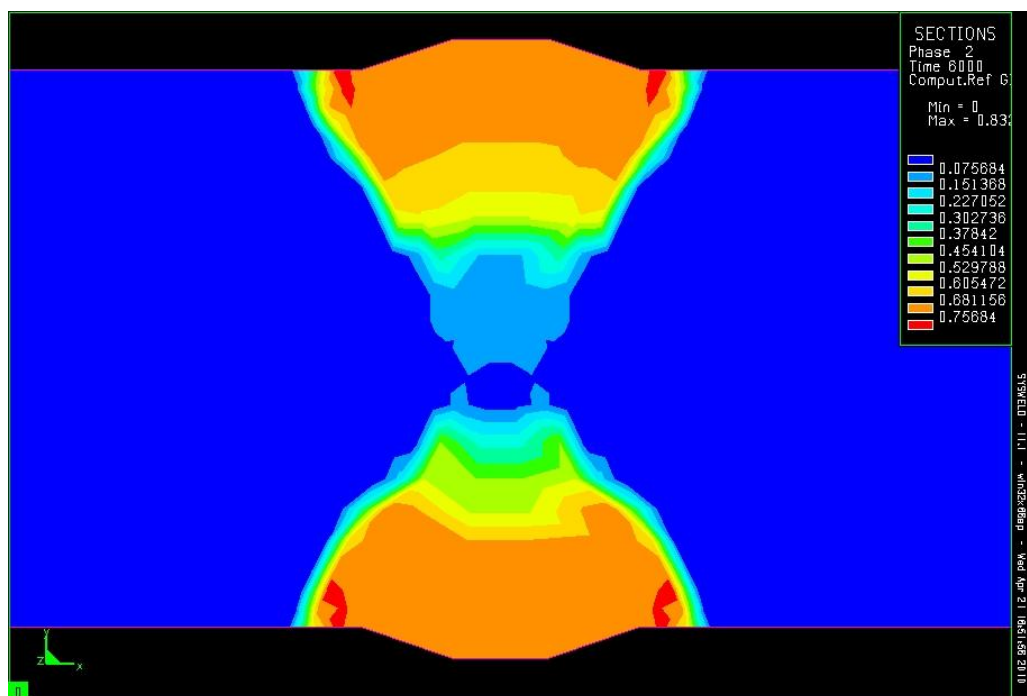
Verifikace výsledné struktury po svařování

Verifikace výsledné nasimulované struktury po svaření s mikrostrukturním rozborem na reálném svaru nebude tak podrobné jako u procesu tepelného zpracování, protože práce [17] nenabízí příslušná výstupních data.

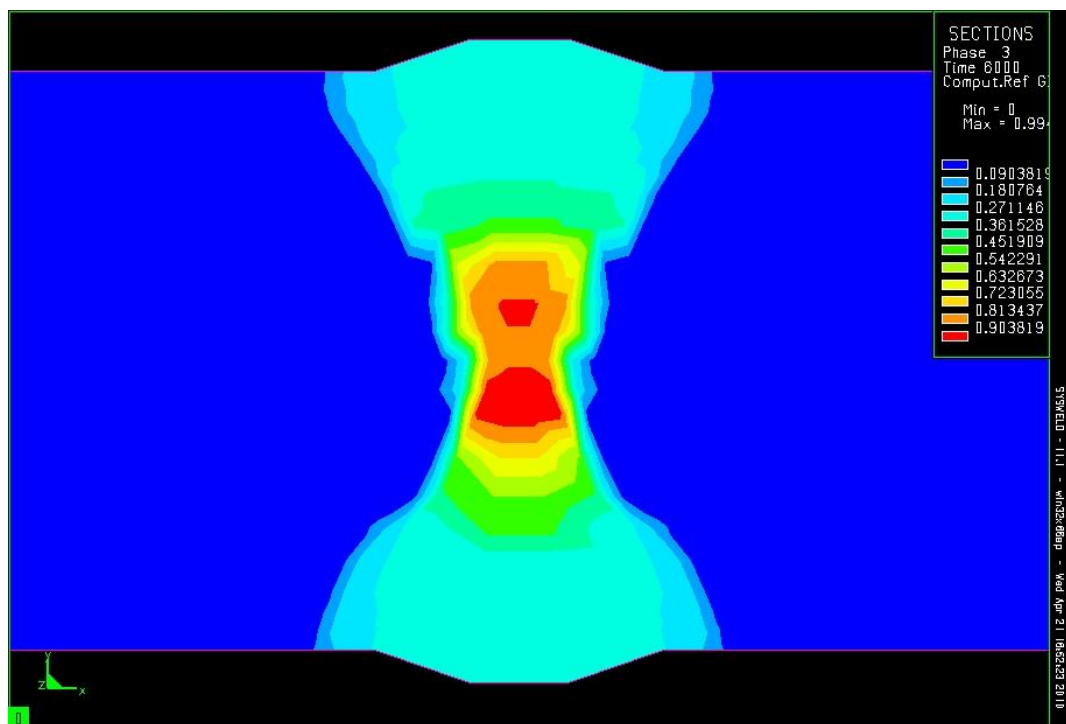
Na následujících obrázcích je v kolmých řezech na osu svaru uvedeno rozložení výsledné struktury po svaření tupého X- svarového spoje. Řezy byly vedeny v polovině délky svarového spoje. Tato strukturní složení byla stanovena numerickou simulací.



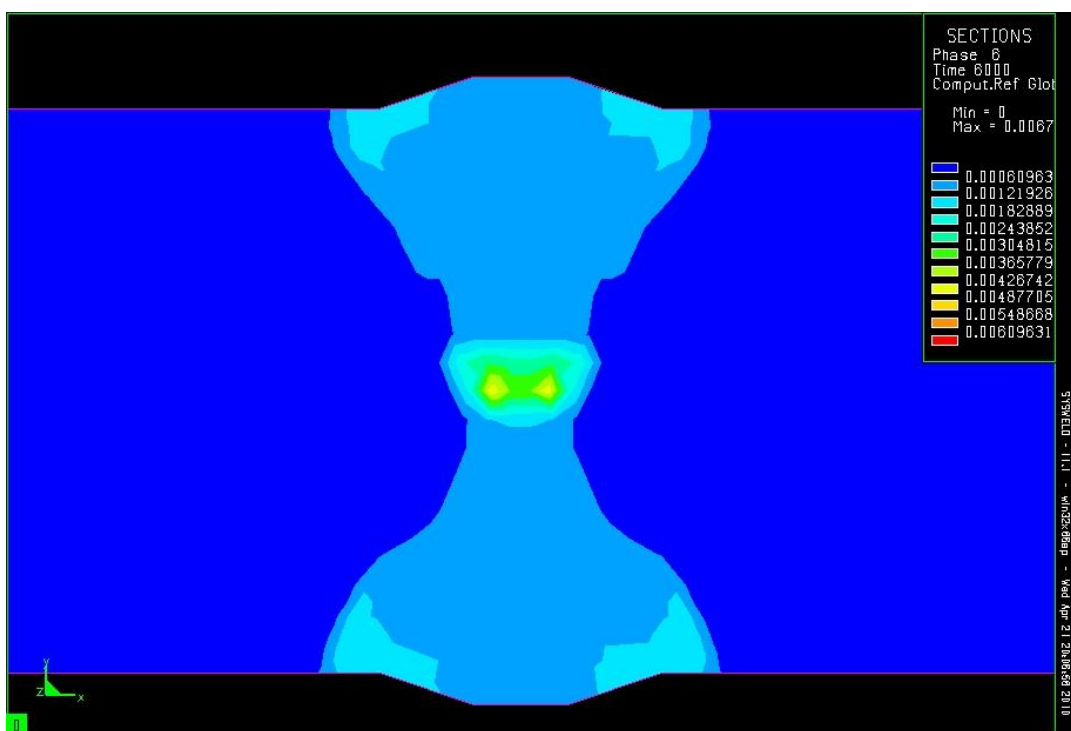
Obrázek č. 76 Rozložení perlitu a feritu v % ve výsledné struktuře svarového spoje



Obrázek č. 77 Rozložení bainitu v % ve výsledné struktuře svarového spoje

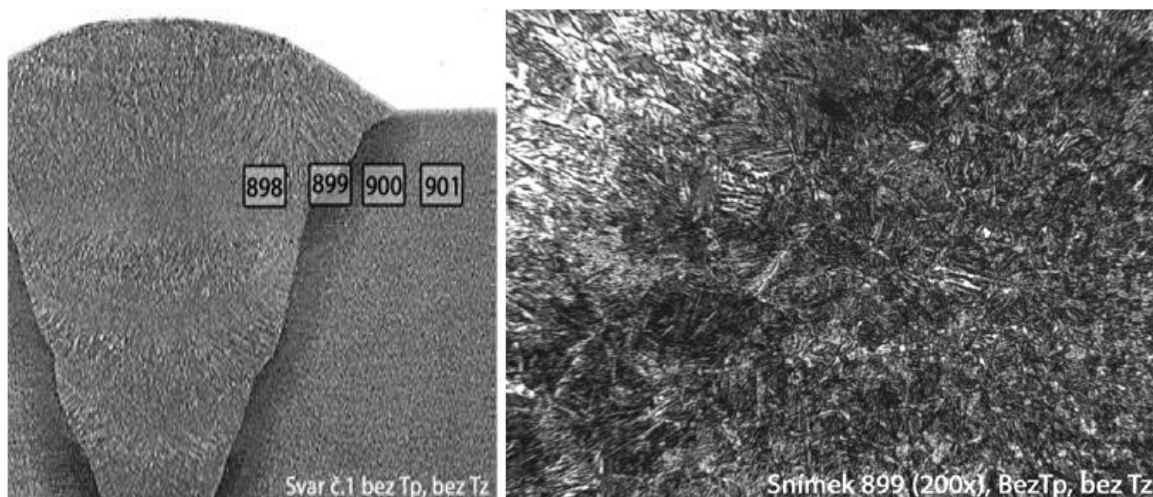


Obrázek č. 78 Rozložení martenzitu v % ve výsledné struktuře svarového spoje



Obrázek č. 79 Rozložení zbytkového austenitu v % ve výsledné struktuře svarového spoje

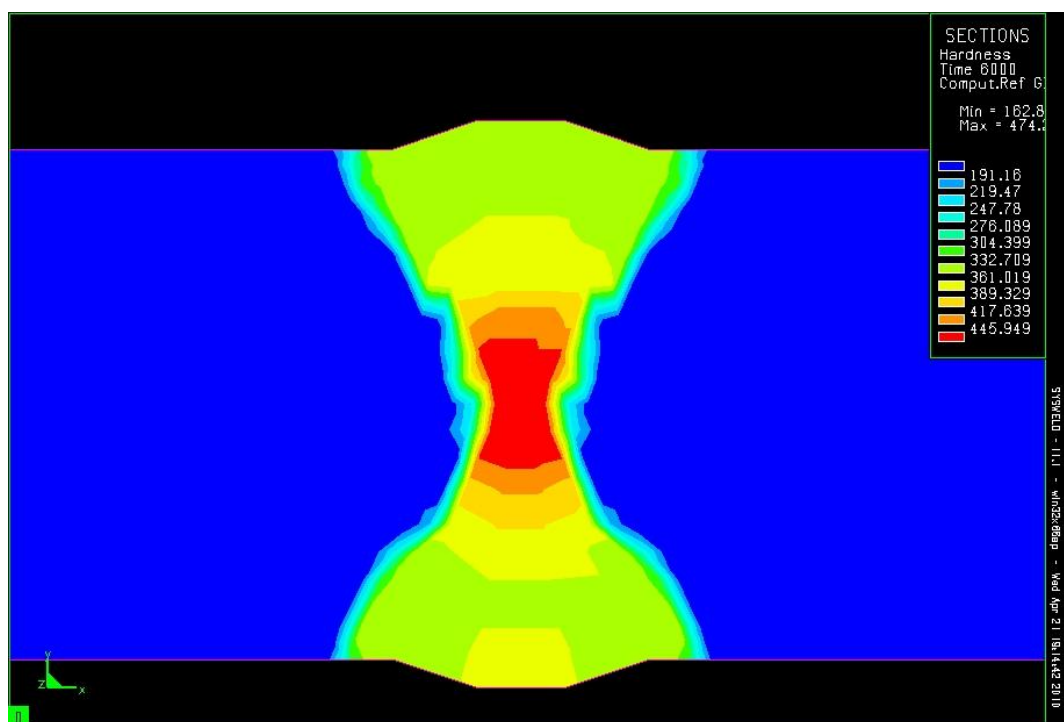
Práce [17] poskytuje pouze jeden náhled na mikrostrukturu svarového spoje. Jde o náhled do hrubozrnného pásma TOO, kde výsledná mikrostruktura svarového spoje je tvořena z bainitu a feritu. Směrem k ose svarového spoje je možno vidět zvětšování procentuální zastoupení feritu ve struktuře, viz obrázek č. 80.



Obrázek č. 80 Mikrostrukturní rozbor pásma přehřátí tupého svarového spoje [17]

Verifikace tvrdosti

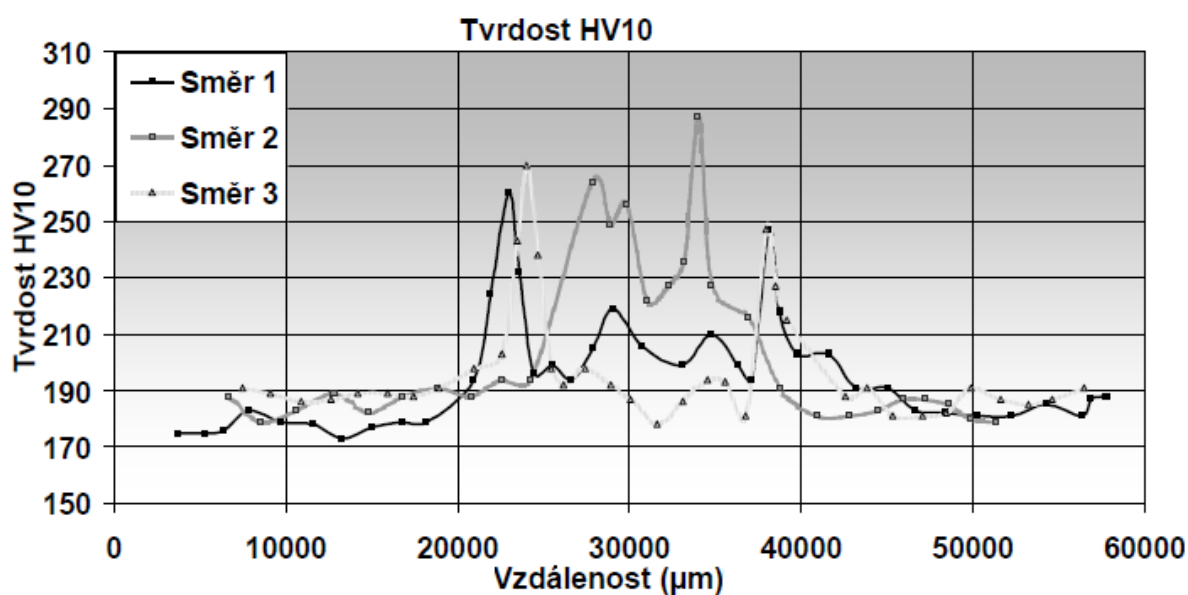
Tvrdost lze ověřovat na příčném řezu svarového spoje, který byl opět veden v polovině svarového spoje. Numericky bylo nasimulovaná tvrdost, ta je zachycena na obrázku č. 81. Experimentální měření na reálném svaru probíhalo ve 3 směrech, postup měření tvrdosti je znázorněn na obrázku č. 82. Směr č. 1 byl ve spodní části svarového spoje, přes housenku č. 8, 2 mm pod povrchem svarových ploch. Druhý směr byl veden přes kořenovou vrstvu svaru a konečně 3 směr byl veden v horní části svarového spoje, přes svarovou housenku č. 6, rovněž 2 mm pod povrchem svarových ploch. Výsledky z měření v těchto směrech jsou graficky zaznamenány na obrázku 83.



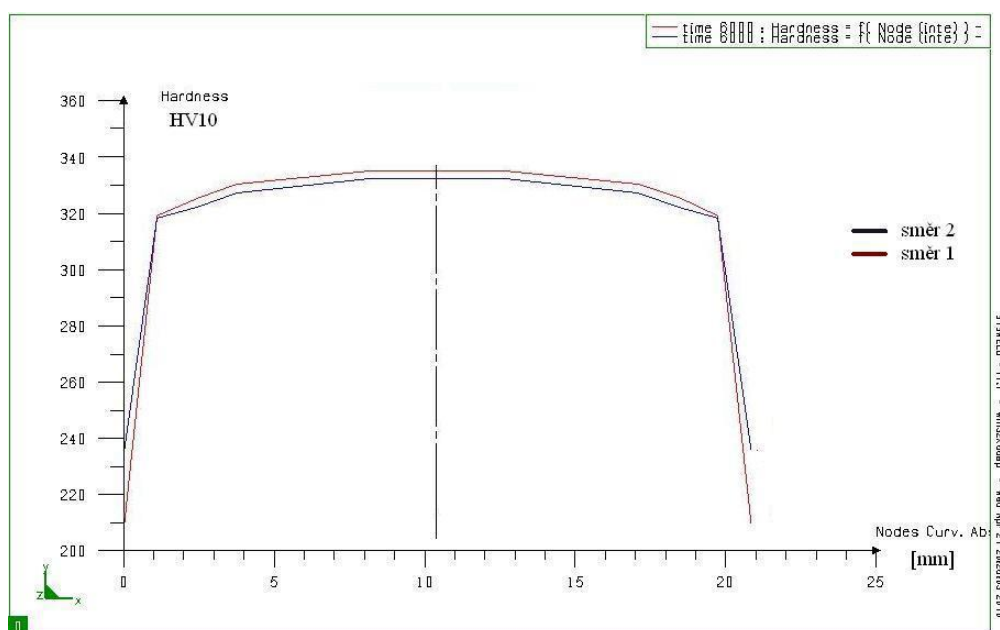
Obrázek č. 81 Průběh nasimulované tvrdosti HV10 v příčném řezu



Obrázek č. 82 Postup měření, vpichy tvrdoměru [17]



Obrázek č. 83 Naměřené průběh tvrdosti v příčném řezu [17]



Obrázek č. 84 Průběh simulovaných tvrdostí HV10 v příčném řezu ve směrech 1 a 2

4. Diskuze dosažených výsledků a návrhy úprav technologického procesu svařování

4.1 Diskuze dosažených výsledků- tepelné zpracování

V první části tohoto experimentu bylo řešeno teplotní pole pro vzorek č. 3, průběh ochlazování, takový jaký je zachycen na obrázku č. 44 se dal logicky předpokládat. Ochlazování z žíhacích teplot muselo zákonitě začít na průsečíku okrajových hran. Řešení teplotního pole pro ostatní vzorky práce neuvádí, jelikož průběh ochlazování je u všech vzorku totožný, s rozdílem doby ochlazování z žíhacích teplot na teplotu okolí.

Dalším krokem toho experimentu, který se již dá porovnat s reálným měřením, byla verifikace výsledné struktury po úplném ochlazení u každého vzorku. Simulované výsledky procentuálního složení struktury jsou uvedeny v tabulce č. 7 a v tabulce č. 8 jsou uvedeny výsledky z mikrostrukturního rozboru prováděného na reálných vzorcích. Numerická simulace stanovila obdobné složení mikrostruktury u vzorku č. 1, 2, 4, 5, pouze u vzorku č. 3 simulace predikovala mikrostrukturu z větší části tvořenou martenzitem. Tato odchylka má za příčinu řadu dalších odchylek v ostatních predikovaných veličinách, jako tvrdost a zbytková napětí. Oproti tomu reálné měření stanovilo u tohoto vzorku fericko-bainitickou mikrostrukturu. Možnou příčinou rozdílného predikování mikrostruktury u tohoto vzorku by mohl být proces ochlazování ve vodě. Numerická simulace předpokládá stacionární odvod tepla z povrchu vzorku vodou, která měla konstantní teplotu 20 °C v celém průběhu ochlazování. Tohoto však v reálné praxi nikde nelze dosáhnout. Ochlazování vzorku č. 3 vodou v experimentálním měření probíhalo v menší nádobě, bez dalšího vloženého pohybu vzorku ve vodě, tudíž nebylo možno dosáhnout oné simulované teploty na povrchu vzorku.

Dále se verifikovaly tvrdosti vzorků. Z tabulky č. 5 je zřejmé, že predikované výsledky numerickou simulací jsou mírně nadsazené s výjimkou vzorku č. 3. Ochlazování tohoto vzorku probíhalo ve vodě a numerická simulace předurčila hodnoty tvrdosti značně vyšší, nežli je prokázáno reálným měřením. Rozdíly tvrdostí jak na povrchu vzorku, tak i ve středu vzorku jsou způsobeny strukturním složením. Numerickou simulací byla predikovaná na povrchu vzorku struktura tvořena 100 % martenzitem, zároveň pro střed vzorku numerická simulace rovněž stanovila strukturu tvořenou z poloviny martenzitickou (viz příloha č. 2). Protože intersticiální zpevnění tuhého roztoku feritu uhlíkem u martenzitické struktury je značené, musela rovněž numerická simulace pro tento vzorek predikovat hodnoty tvrdosti značně vyšší, nežli jsou hodnoty stanovené experimentálním měřením na reálných vzorcích. Kde již struktura dle tabulky č. 6 u tohoto vzorku nebyla tvořena touto nepříznivou martenzitickou strukturou. Rovněž jako další zdroj nejistot ve stanovení predikce tvrdosti

vidím výpočetní modul pro vyhodnocování tvrdostí v programu Sysweld (Hardness Wizard). Tento modul pro výpočet tvrdosti vyžaduje nutně předepsat výchozí hodnoty tvrdosti pro martenzit a bainit. Udáním těchto hodnot nutně vnášíme do výpočtu chyby, protože tyto hodnoty nelze takovýmto odhadem přesně stanovit.

Poslední částí tohoto experimentu byla verifikace hodnot zbytkových napětí dle hypotézy HMM. Ověřovaly se průběhy hodnot napětí ve směru 2 a to u všech vzorků. Komplexní pohled pro vyhodnocení výsledků uvádí obrázky č. 55 a 56. Porovnat hodnoty zbytkových napětí je pouze možno do hloubky 1 mm pod povrchem vzorku. Pro vzorky č. 1, 4, 5 simulace stanovila zbytková napětí nulové hodnoty a pro zbylé vzorky jsou výsledné hodnoty s drobnými odchylkami podobné hodnotám, které byly stanoveny experimentálním měřením odvrťovací metodou. Nulové hodnoty u vzorků č. 1, 4, 5 s určitou nepřesností rovněž odpovídají experimentálním hodnotám. Odpověď na možnou příčinu nepřesností je možno nalézt v křivce „výchozí stav“ na obrázku č. 56. Tato křivka udává hodnotu zbytkových napětí ve výchozím materiálu, tzn., že již ve výchozím stavu materiál obsahuje zbytková napětí dosahující určité úrovně. Predikované hodnoty zbytkových napětí u vzorku č. 4 a 5 jsou nulové a to z důvodu, že žíhací teplota je nižší než teplota A_{c1} této oceli, tudíž nedojde k žádné překrystalizaci a tím nevzniknou žádná strukturní pnutí, počítat lze jen s termickým pnutím, která ovšem dle numerické simulace vymizí a to díky dostatečně dlouhému ochlazování. Hodnoty zbytkového napětí stanové reálným měřením na těchto vzorcích (č. 4 a 5) sníží svou hodnotu zbytkových napětí oproti hodnotám zbytkového napětí, které jsme naměřili na vzorku výchozího stavu a to díky odpevňovacím pochodům, které ovšem neproběhnou v plném rozsahu. Zároveň experimentálním měřením u vzorku č. 1 bylo predikci potvrzeno zbytkového napětí nulové hodnoty, ochlazování z teplot 1000 °C pomalým ochlazováním na vzduchu, odpovídá ochlazování po normalizačním žíhání, kdy získáváme rovnovážnou strukturu, proto hodnoty zbytkových napětí klesly téměř na nulu.

4.1 Diskuze dosažených výsledků- svařování a návrhy úprav technologického procesu

Diskuze dosažených výsledků- svařování

V druhém experimentu byl simulován namodelovaný tupý X svarový spoj. V první části experimentu jsou prezentovány výsledky z teplotního řešení. Jednalo se o průběhy ochlazování svarového spoje po kompletním svaření. Z těchto nabízených výsledků je asi nejzajímavější fakt, že na odvodu tepla ze svaru se v příčném směru svarových desek podílí pouze 1/5 délky (viz obrázek č. 67). Rovněž zajímavé jsou výsledky tepelného ovlivnění tepelnými zdroji, v práci jsou pro poslední svar zobrazena pásma teplem ovlivněné oblasti. Jediným prvkem, který se v teplotním řešení dal ověřit, a porovnat s experimentálním měřením jsou teplotní cykly svařování. Na obrázku č. 74 je zobrazen teplotní cyklus, který byl stanoven numerickým výpočtem. Na dalším obrázku je hned pro názornost vykreslen teplotní cyklus téhož bodu, který byl získán reálným snímáním teplot na termočlánek. Oba teplotní cykly se až na velice drobné nepřesnosti shodují, drobné rozdíly lze vidět v lokálních maximech jednotlivých svarových housenek.

V další části tohoto experimentu jsou uvedeny výsledky ze strukturního rozboru. Nasimulované výsledky lze pouze omezeně verifikovat s reálným stavem, protože práce [17] nenabízí všechny tyto výstupní výsledky. Ale i přesto nasimulované výsledné struktury působí věrohodně a reálně. Výsledná struktura ve svarech č. 1, 2 a 3 je z větší části tvořena martenzitem, jak si je možno všimnout na obrázku č. 78, kde martenzit tvoří v některých oblastech až 90 % z výsledné struktury. Toto složení struktury je v kořených oblastech svarového spoje možné, protože vlivem studeněného základního materiálu může dojít k rychlému vyrovnávání teplot mezi svarem a základním materiálem. Takto rychlý odvod tepla způsobí vysokou rychlost ochlazování svarového spoje, a tudíž lze v těchto oblastech očekávat strukturu, která bude zakalena na martenzit. V dalších oblastech svarového spoje, to je ve svarech č. 4 až 6 se již tento efekt neuplatňuje, protože svařovaný materiál je svařovacím procesem předeřhřát na určitou teplotu, to způsobí zmenšení rychlosti ochlazování v těchto částech. Výsledná struktura je zde pak podle numerické simulace složena feritem, bainitem a martenzitem, největší zastoupení má zde bainit.

Náplní poslední části tohoto experimentu byla predikce tvrdosti svarového spoje po svaření. Numerická simulace stanovila průběhy tvrdosti ve všech třech směrech měření značně vyšší, nežli bylo prokázáno vlastním měřením na reálném svaru. Největší rozdíly tvrdosti až 70 HV10 byly v kořenových oblastech, kde právě pro tuto oblast numerická simulace určila strukturu téměř zcela martenzitickou, proto jsou rozdíly tvrdosti značně rozdílné. Menší rozdíly tvrdostí (50 HV10) byly pak ve směrech 1 a 3, snímání průběhů

tvrdostí v těchto směrech probíhalo 2 mm pod povrchem svarových ploch, přičemž směr 1 byl veden přes vrchní čas svaru (housesku č. 6) a směr 2 byl veden přes dolní část svaru (housesku č. 8). Možný zdroj nepřesnosti může být opět v použitém modulu programu Sysweld pro výpočet tvrdosti, o kterém jsem se již zmiňoval v předešlém bodě. Tento modul pro výpočet potřebuje nutně zadat počáteční tvrdost fází martenzitu a bainitu. Odborným poradce mi bylo doporučeno pro materiál S355J2G3 používat počáteční tvrdosti HV10 pro martenzit 400 a pro bainit 300. Porovnáním výsledných vypočtených tvrdostí se skutečnými tvrdostmi, které byly naměřeny na reálném svarovém spoji, bylo zjištěno, že doporučené hodnoty počátečních tvrdostí jsou zřejmě nadsazené. Otázkou je, jak stanovit počáteční hodnoty tvrdostí fází martenzitu a bainitu? Nejrozumnějším východiskem je tyto hodnoty stanovit reálným měřením na vlastním materiálu, pro který bude proces svařování numericky simulován. Toto však nelze u numerických simulací, které provádíme pouze orientačně, pro predikci výstupních výsledků. Z obrázku č. 84 je patrné, že navržený modul pro výpočet tvrdosti (hardness Wizard) nebere ohled na lokální změny struktury a velikosti zrna způsobené teplotním cyklem. Po svařování v hrubozrnném pásmu teplem ovlivněné oblasti svarového spoje obvykle dosahujeme lokálního zvýšení tvrdosti oproti ostatním částem svarového spoje, což je další nedokonalost tohoto modulu.

Návrhy úprav technologického procesu svařování

Jednou z obrovských výhod numerických simulací je možnost zkoušet, měnit a upravovat vstupní parametry výpočtu a tudíž si lze udělat rychlý nadhled, co se stane a jakým směrem se posunou výstupní data. Vstupními parametry, které lze měnit při numerické simulaci svařování jsou teplota přehřevu, dohřevu, teplota interpass, zároveň se nabízí možnost neomezeně modifikovat tepelné zdroje, tím vnesené teplo do svaru na jednotku jeho délky, dále pak možnost zkoušet různé způsoby upnutí a to jsou jen některé z možných okrajových podmínek, které lze před samostatným výpočtem modifikovat. Rovněž se nabízí možnost numericky simulovat různé kombinace jednotlivých technologických procesů. Tím mám na mysli situaci, kdy model prvotně podrobíme numerické simulaci, kdy lokálně do určitého místa numerického modelu nadefinujeme průběh tepelného zdroje, který bude simulovat proces svařování, a následně celý model podrobíme další numerické simulaci, což by v tomto případě mohlo být tepelné zpracování.

Navržený numerický model tupého X svarového spoje, je prakticky připraven pro takovou to analýzu vstupních podmínek. Práce [17] a [18] ve své experimentální části zkoušely modifikovat proces svařování a následného tepelného zpracování výroby této

svařované konstrukce. První způsob výroby byl bez předehřevu a bez konečného tepelného zpracování, což je způsob, který je realizován v této práci. Další způsoby byly:

2. s předehřevem 150 °C a bez dalšího tepelného zpracování,
3. bez předehřevu a s následným žíháním na snížení napětí (650 °C/2hod v peci),
4. s předehřevem a s následným žíháním na snížení napětí (650 °C/2hod v peci).

Všechny tyto možné způsoby výroby svařované konstrukce by bylo možné numericky simulovat a následně verifikovat se skutečností, vzhledem k rozsahu práce, toto již nebylo předmětem dalšího zkoumání.

Dobrou alternativu při úpravě svařovacího procesu shledávám v předehřevu svarových ploch. Ocel S355J2G3 svým chemickým složením odpovídá uhlíkové oceli. Pro tyto oceli je dle [19] doporučeno počítat teplotu předehřevu podle výpočtových empirických vztahů podle autora Seferiana. Seferian pro stanovování teploty předehřevu zahrnul do svých výpočtových vztahů vliv chemického složení oceli a vliv tuhosti svařovaného materiálu, čili tloušťku svařovaných dílů.

Teplota předehřevu pro ocel S355J2G3 vyšla 150 °C, touto teplotou předehřevu bychom měli po svaření dosáhnout celistvého svarového spoje. Proto předmětem další numerické simulace a následného rozboru výstupních hodnot, by měla být varianta výroby č. 2. Simulace by teda měla probíhat při předehřevu svarových ploch 150°C a následné dodatečné tepelné zpracování už by nemělo být potřebné.

5. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala numerickými simulacemi procesů tepelného zpracování a svařování technologiemi MIG/MAG (131/135).

V úvodní části práce bylo provedeno studium svařování výše zmiňovanými technologiemi, byly vysvětleny a definovány základní pojmy a poznatky z oblastí svařování technologiemi v ochranných plynech. V další teoretické části bylo provedeno současné studium numerických simulací se zaměřením na modelační program Visual-Mesh a simulační program Sysweld, neboť tyto dva kompatibilní programy poskytované firmou ESI Group, učinily největší pokrok v podávání nepřehledného množství výstupních dat. V teoretickém rozboru jsem na jednoduchém koutovém spoji názorně uvedl jak postupovat při tvorbě vlastního numerického modelu a co všechno musí numerický model obsahovat před vlastní numerickou simulací. Na pozadí programu Sysweld jsem uvedl jak postupovat při zadávání numerické simulace, jak naladit svařovací zdroj tepla, jak spustit samostatnou simulaci a jak postupovat při vizualizaci výstupních dat a výsledků.

Výsledkem teoretické části jsou podklady pro vlastní experimentální činnost. Kde v druhém kroku byl navrhnut jednoduchý 3D numerický model ve tvaru kvádrů o rozměrech (50 x 50 x 10) mm, na kterém jsem simuloval 5 různých druhů tepelného zpracování. Dále jsem rovněž navrhnul 8 housenkový 3D model tupého svarového X spoje o tloušťce 30 mm, který posloužil pro numerickou simulaci svařování. Pro oba dva modely byl při numerické simulaci vybrán materiál z dostupné nabídky materiálů, jednalo se o ocel, která je určena pro svařované konstrukce a to ocel označenou dle normy EN 10025-94 a nese označení S355J2G3. Diskretizace modelů byla provedena tak, abychom výpočtem získali co nejpřesnější výsledky v oblastech, kterých technologický proces způsobí značné změny vlastností.

V dalším kroku tyto modely posloužily pro vlastní numerickou simulaci. Kde na numerickém modelu pro tepelné zpracování se simulovalo 5 různých druhů tepelného zpracování a jako výstupní data pro následnou verifikaci byly použity průběhy zbytkových napětí, tvrdostí a rovněž taky stavy struktur jak na povrchu, tak i ve středu součásti po úplném ochlazení. Před vlastní numerickou simulací svařování, byly každé namodelované housence tupého svarového spoje naladěny příslušné zdroje tepla, tak aby svým tvarem a velikostí tavné zóny odpovídaly po konečném svaření výsledné makrostruktuře svarového spoje. Pomocí numerické simulace byly u svařované konstrukce zjišťovány průběhy zbytkových napětí a to jak ve směru kolmém na osu svaru, tak i ve směru rovnoběžném s osou svaru. Dále pak průběhy tvrdostí v příčném řezu, který byl veden v polovině délky svařované konstrukce.

Všechny takto numerickou simulací zjištěná data byly následně verifikovány s daty, které byly zjištěny měřením na reálných vzorcích. V poslední části diplomové práce jsem provedl diskuzi dosažených výsledků a uvedl jsem možné důvody příčiny odchylek výsledků. K výslednému zhodnocení a především k výstupním výsledkům z numerické simulace bych ještě rád podotkl, že teoreticky lze získat strukturu, která bude tvořena pouze martenzitickou rozpadovou strukturou, tak jak uvádí numerická simulace. Tohoto ale ve skutečnosti lze těžko docílit, v praxi nelze předpokládat 100 % rozpad austenitu na martenzit, nýbrž lze očekávat strukturu, která bude tvořena směsí více fází. Tím lze taky z části odůvodnit rozdíly v průbězích tvrdostí. Dále pro proces svařování byly nastíněny možné úpravy svařovacího procesu, které je možno snadno a rychle pomoci numerické simulace realizovat. Účelem úprav svařovacího procesu by mělo být především zajištění optimálnějších a výhodnějších výsledků.

Přesné a úplné zadání vstupních parametrů, tím nemám, namysli jen svařovací parametry, ale i přesnější a věrohodnější vymodelování numerických modelů má za následek obvykle prodloužení doby výpočtu vlastní numerické simulace, ale zajistíme tím přesnější výstupní data.

Výsledky a výstupy diplomové práce poslouží v rámci branchmarkingu. Branchmarking nejstručněji můžeme vyjádřit jako proces srovnávání výstupních dat. Předmětem srovnávání jsou jak experimentální data z procesu tepelného zpracování, tak i výstupní experimentální data ze svařování tupého X svarového spoje.

Numerická simulace v rukou schopných lidí v dnešní době představuje obrovský nástroj, jak snížit výrobní náklady a v neposlední řadě umožňuje předcházet výrobě neshodných výrobků.

6. Seznam použité literatury

- [1] KOPŘIVA, R. *Technológia zvarania v ochranných plynoch metódou MIG/MAG*. 1. vydání. Ostrava: Zeross, 1993. 194 s. ISBN 80-85771-004-4.
- [2] OCHODEK, V. *Výpočet příkonu svařování*. [počítačový soubor, disketa 3,5"]. 3/2001 [cit. 2008-11-02]
- [3] NĚMEC, J. *Fyzikální a metalurgické základy obloukového svařování*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1977
- [4] MINAŘÍK, V. *Obloukové svařování*. 2. vydání. Praha: Scientia, 2003. 241 s. ISBN 80-7183-285-5.
- [5] SZTEFEK, R. Analytický výpočet teplotních cyklů pro tavné svařování. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, Fakulta strojní, katedra mechanické technologie- 345. 2008. 48 s. Bakalářská práce. vedoucí: Ochodek, V.
- [6] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vydání. Ostrava: Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [7] KOLEKTIV AUTORŮ. *Moderní trendy ve svařování MAG*. 1. vydání. Ostrava: Repronis, 2001. 110 s. Sborník přednášek, 4.-5.10.2001. ISBN 80-85988-66-6.
- [8] ESI GROUP. *Visual-Mesh V4.0 Tutorials*. 2008. 260 s. ESI Group Learning Solutions. ISBN 80-85988-66-6.
- [9] SLOVÁČEK, M. Numerické simulace svařování. *MM Průmyslové spektrum*, říjen 2009, ročník. 10, s. 44-45.
- [10] ESI GROUP. *Sysweld Welding Advisor- General Presentation*. 2006. 94 s. ESI GROUP Learning Solutions.

- [11] ESI GROUP. *T-Joint- How to use the Heat Input Fitting Tool to Calibrate the Heat Source*. 2008. 36 s. ESI GROUP Learning Solutions.
- [12] ESI GROUP. *T-Joint- Set up of the computation*. 2006. 60 s. ESI GROUP Learning Solutions.
- [13] ESI GROUP. *T-Joint- Post-processing*. 2006. 72 s. ESI GROUP Learning Solutions.
- [14] OCHODEK, V. *Experiment 1- tepelné zpracování*. [počítačový soubor, disketa 3,5"]. 3/2003 [cit. 2010-28-03].
- [15] OCHODEK, V. *Experiment 2- svařování tupého svarového spoje*. [počítačový soubor, disketa 3,5"]. 5/2004 [cit. 2008-28-04].
- [16] ČSN EN ISO 14175. *Svařovací materiály- Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, září 2009. 12s.
- [17] ŠPITT, M. *Vliv tepelného režimu svařování na vybrané vlastnosti feritických ocelí*. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2008. 62s. Diplomová práce, vedoucí Ochodek, V.
- [18] KLIMEK, P. *Hodnocení vybraných vlastností svarových spojů magnetoelastickou metodou*. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2008. 64s. Diplomová práce, vedoucí Ochodek, V.
- [19] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I* Učební texty. 1. vydání. Editační středisko VŠB - TUO Ostrava. 2005. 133 s.
- [20] HŘIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a Zlatin*. 1. vydání. Vydavateľstvo slovenskej akademie vied. Bratislava 1989. 344s. ISBN 80-224-0016-5.

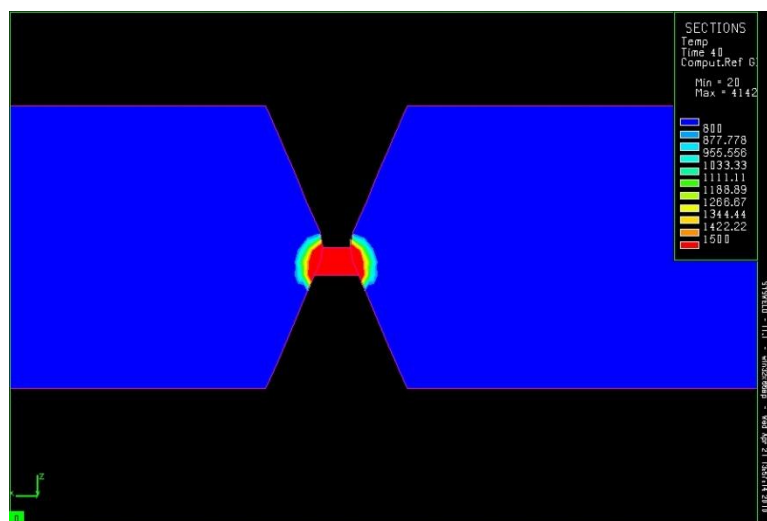
- [21] ASM. *Handbook vol. 6. Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
- [22] *Numerické simulace svařování jako podpora výroby* [online]. 2008-11-11 [cit. 2010-02-03]. Dostupné z: <[http://technik.ihned.cz/index.php?p=800000_d&&article\[id\]=39009090](http://technik.ihned.cz/index.php?p=800000_d&&article[id]=39009090)>.
- [23] *4shared.com* [online]. 2009-07-13 [cit. 2010-02-05]. Dostupné z: <http://www.4shared.com/file/117818314/c2244270/guidelines_gmaw.html>.
- [24] PRAXAIR. *Stainless welding manual* [online]. c1998, 1999 [cit. 2010-02-05]. Dostupné z: <http://www.onlinefreebooks.net/go.php?url=http://www.prest-o-sales.com/other_links/sales.com/other_links/gases/PDF/ShieldingGases/Manuals/GMAW%20of%20Stainless%20Steel.pdf>.
- [25] *Numerické simulace svařování a tepelného zpracování* [online]. 2008-10-02 [cit. 2010-02-03]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/numericke-simulace-svarovani-a-tepelneho-zpracovani>>.

8. Seznam příloh

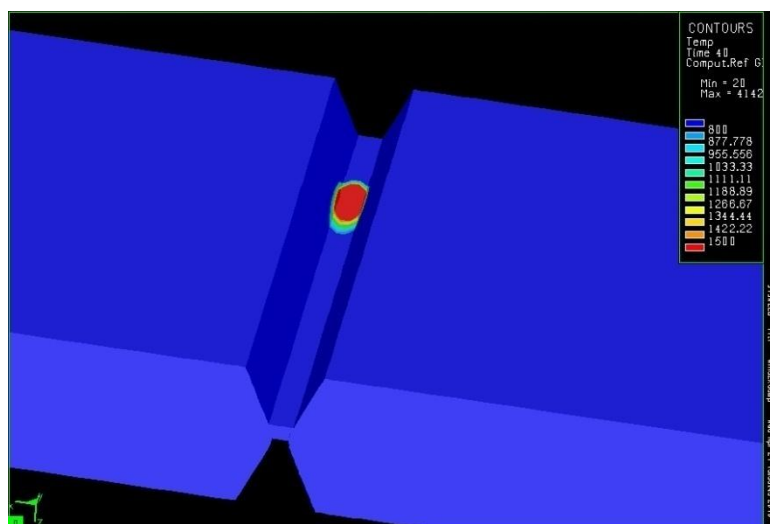
Příloha č. 1 Ukázky naladěných zdrojů tepla svarů 1 až 7

Příloha č. 2 Průběhy tvrdosti stanovených numerickou simulací u vzorků 2 až 5

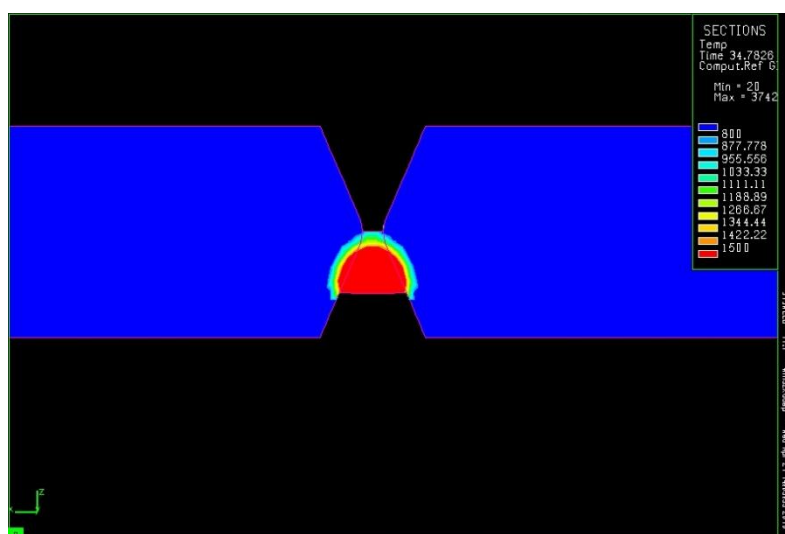
Příloha č. 1 Ukázky nalaďených zdrojů tepla svarů 1 až 7



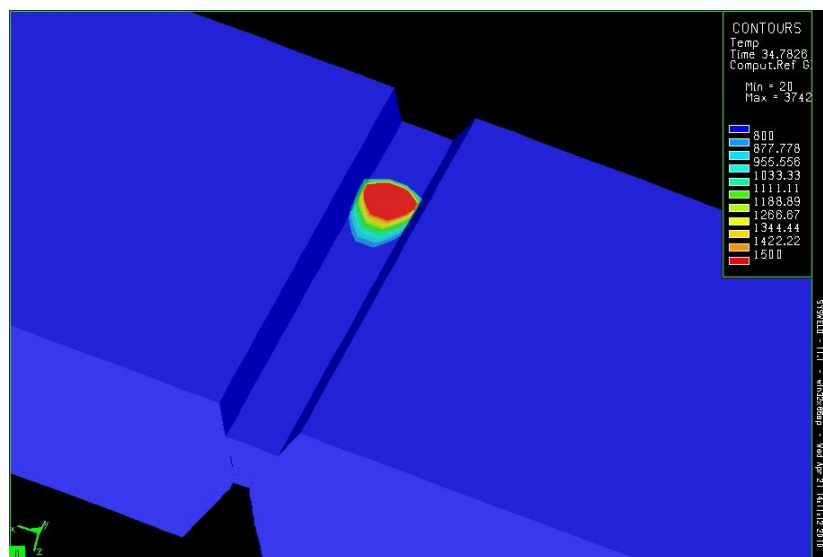
Obrázek č. 85 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 1 – pohled v řezu (jednotky ve °C)



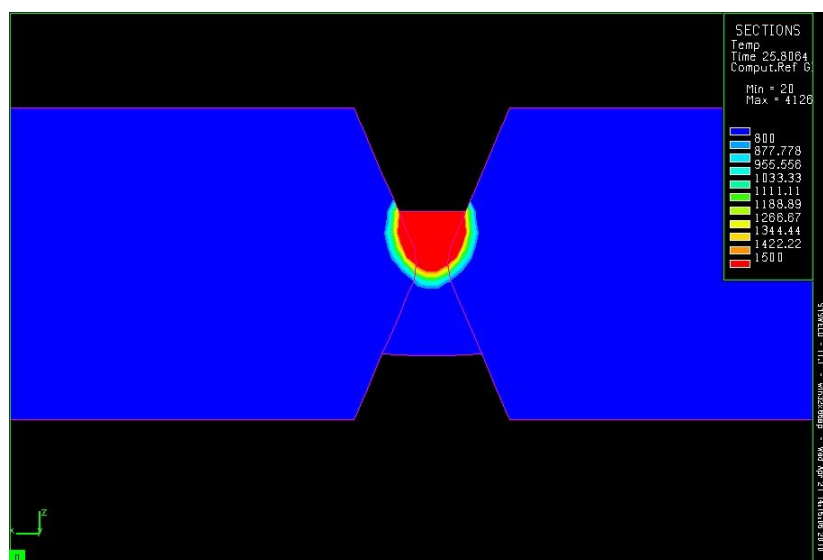
Obrázek č. 86 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 1 - pohled shora (jednotky ve °C)



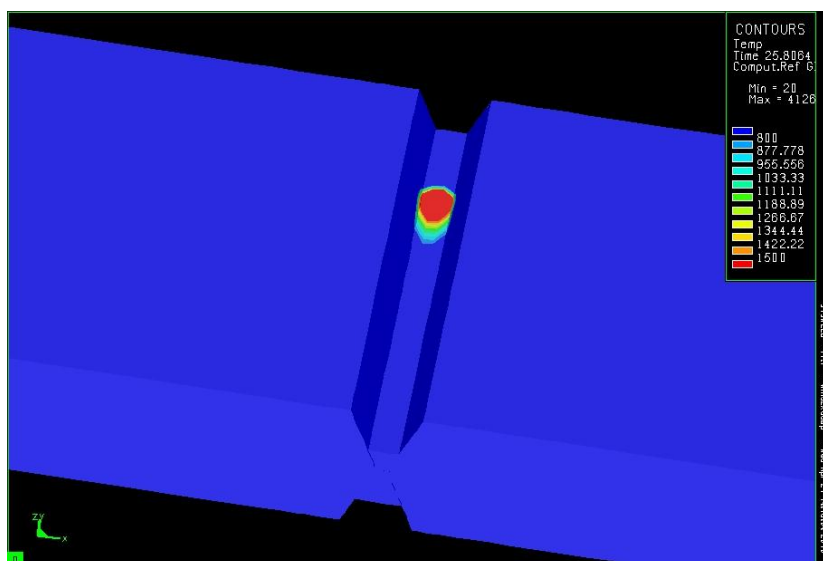
Obrázek č. 87 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 2- pohled v řezu (jednotky ve °C)



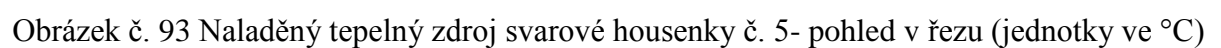
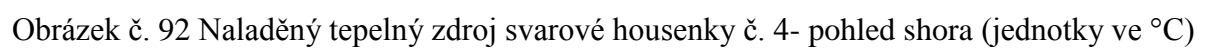
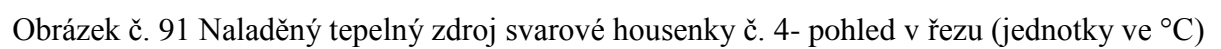
Obrázek č. 88 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 2- pohled shora (jednotky ve °C)

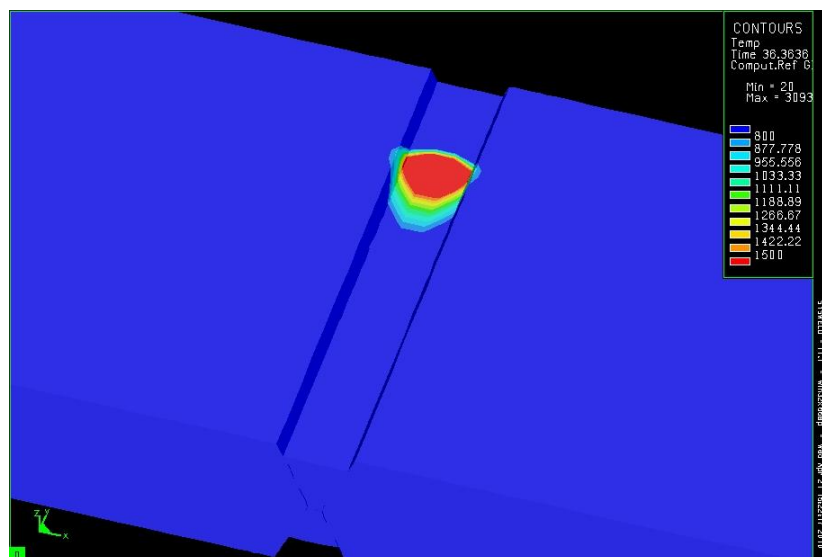


Obrázek č. 89 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 3- pohled v řezu (jednotky ve °C)

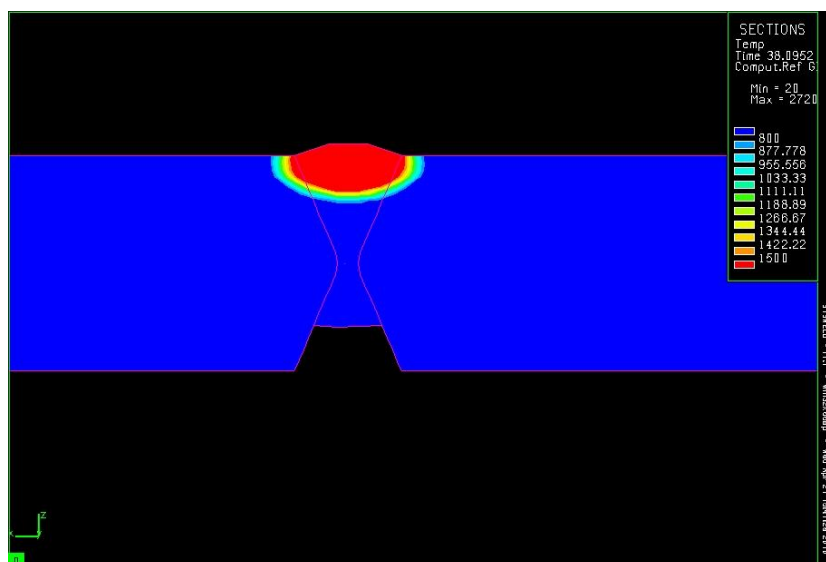


Obrázek č. 90 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 3- pohled shora (jednotky ve °C)

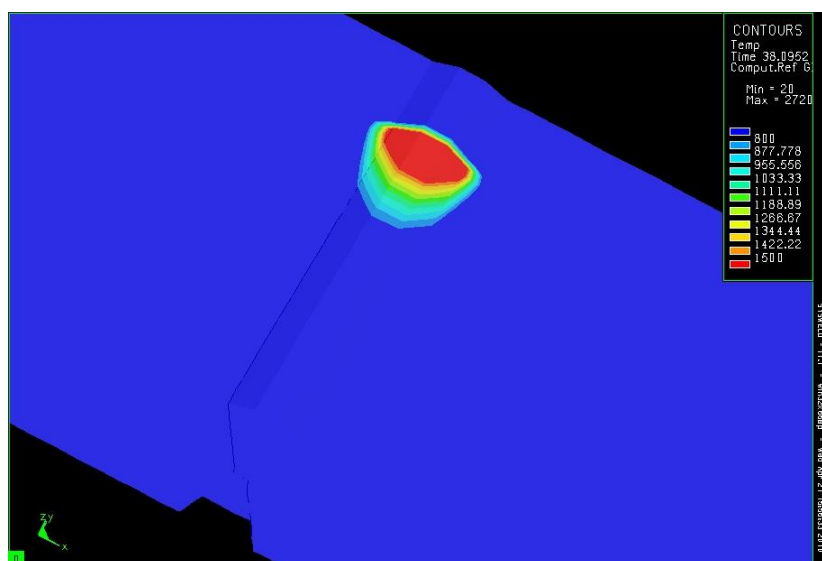




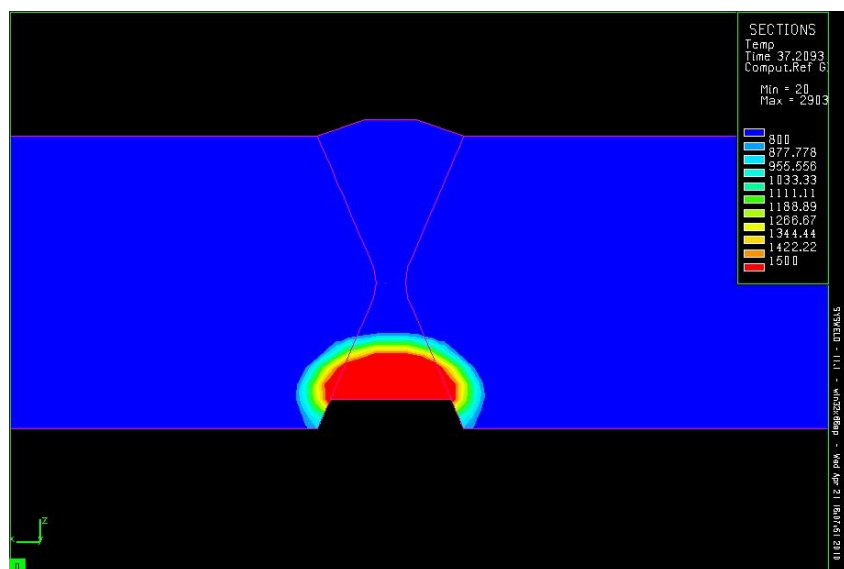
Obrázek č. 94 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 5- pohled shora (jednotky ve °C)



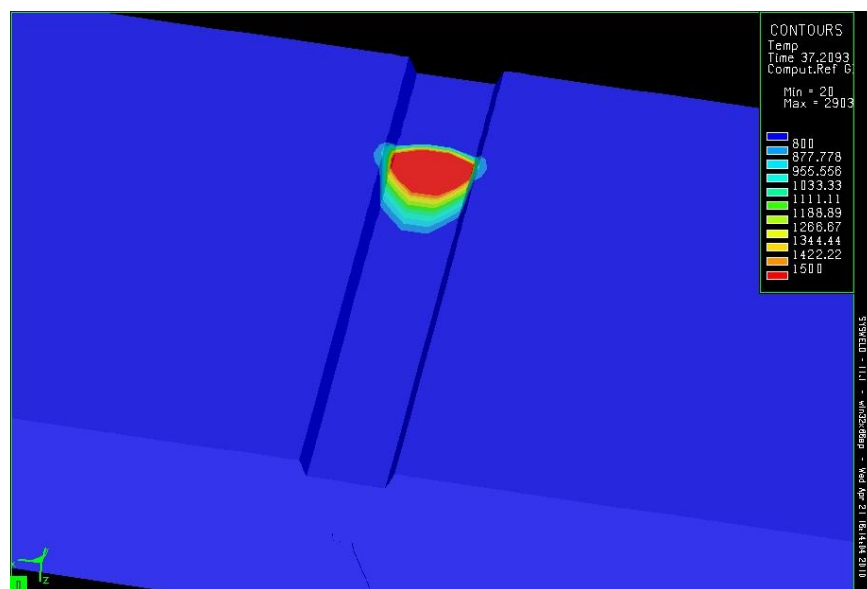
Obrázek č. 95 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 6- pohled v řezu (jednotky ve °C)



Obrázek č. 96 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 6- pohled shora (jednotky ve °C)

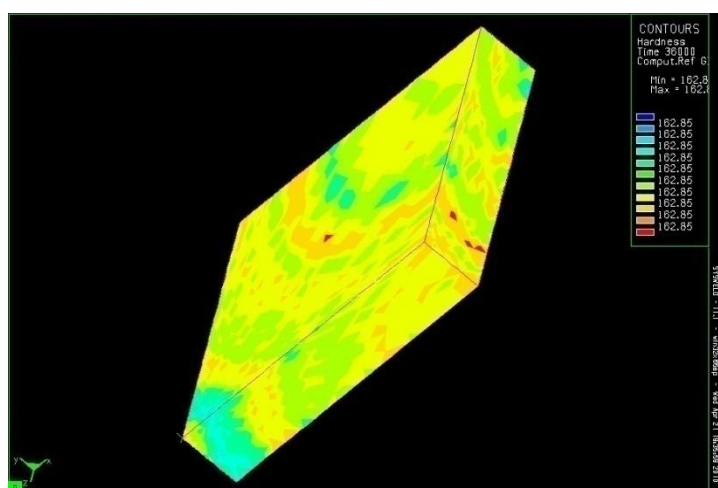


Obrázek č. 97 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 7- pohled v řezu (jednotky ve °C)

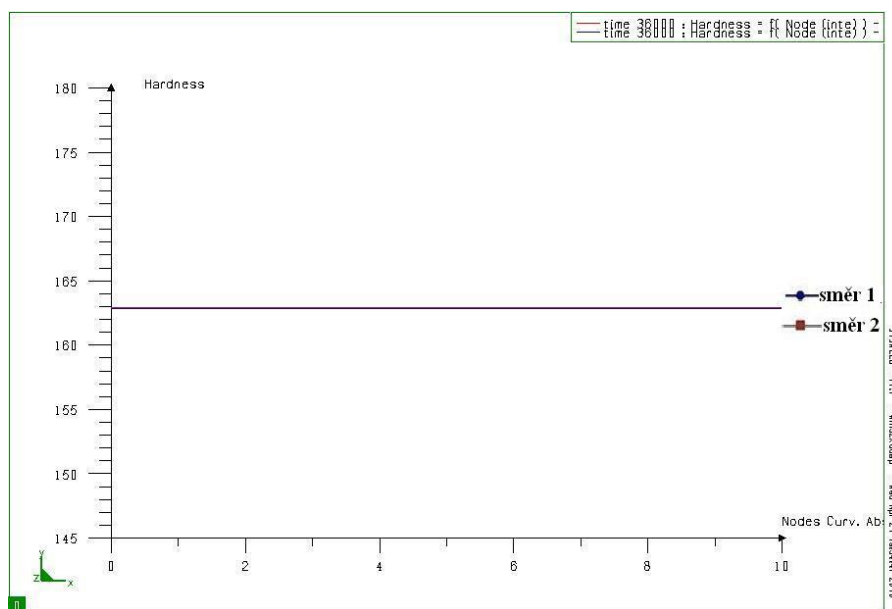


Obrázek č. 98 Naladěný tepelný zdroj svarové housenky č. 7- pohled shora (jednotky ve °C)

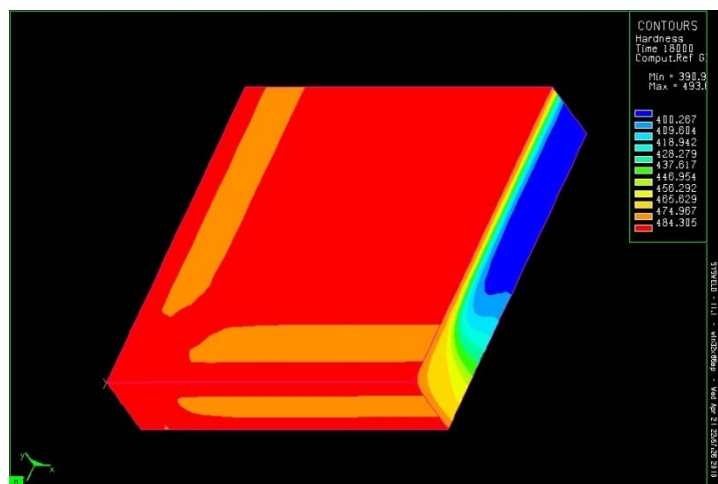
Příloha č. 2 Průběhy tvrdosti stanovených numerickou simulací u vzorků 2 až 5



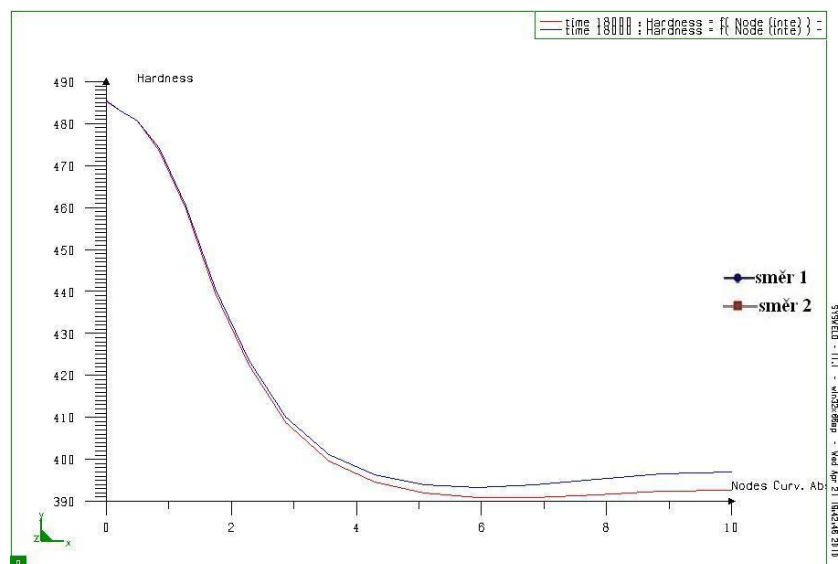
Obrázek č. 99 Tvrdost HV10 po ochlazení- vzorek č. 2



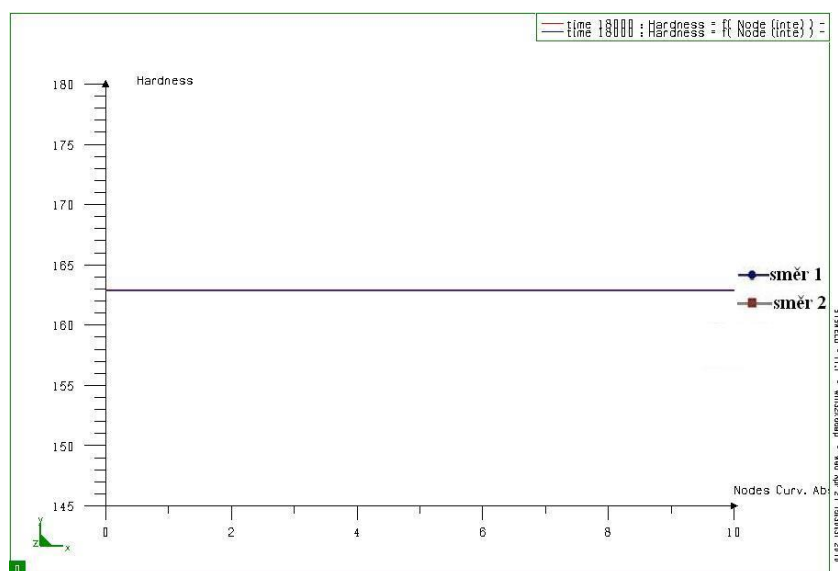
Obrázek č. 100 Simulací predikovaný průběh tvrdosti HV10 ve směrech 1 a 2- vzorek č. 2



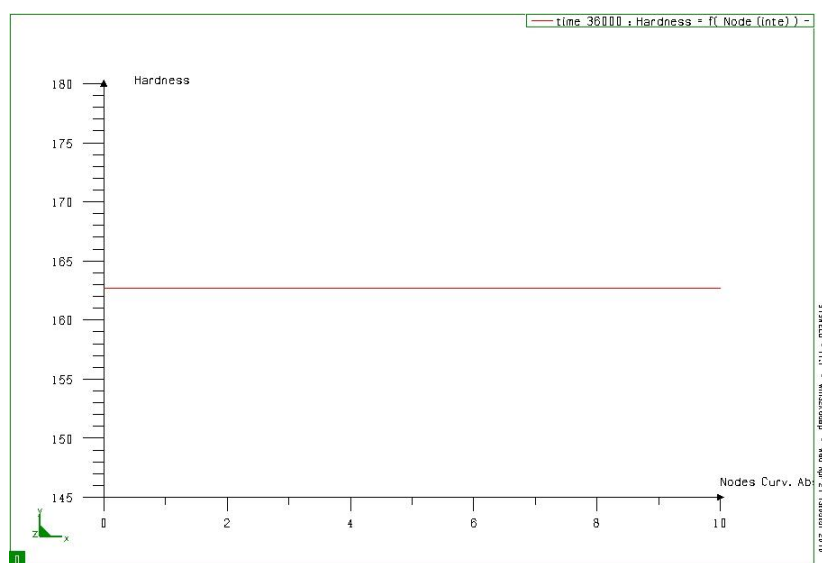
Obrázek č. 45 Tvrdost HV10 po ochlazení- vzorek č. 3



Obrázek č. 101 Simulací predikovaný průběh tvrdosti HV10 ve směrech 1 a 2- vzorek č. 3



Obrázek č. 102 Simulací predikovaný průběh tvrdosti HV10 ve směrech 1 a 2- vzorek č. 4



Obrázek č. 103 Simulací predikovaný průběh tvrdosti HV10 ve směrech 1 a 2- vzorek č.5